

Los peligros volcánicos asociados con el **Cayambe**

Pablo Samaniego
Jean-Philippe Eissen
Michel Monzier
Claude Robin
Alexandra Alvarado
Hugo Yepes



IG
INSTITUTO GEOFÍSICO DE
LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

IRD
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT

Serie

Los peligros
volcánicos en Ecuador


CORPORACIÓN
EDITORIA NACIONAL

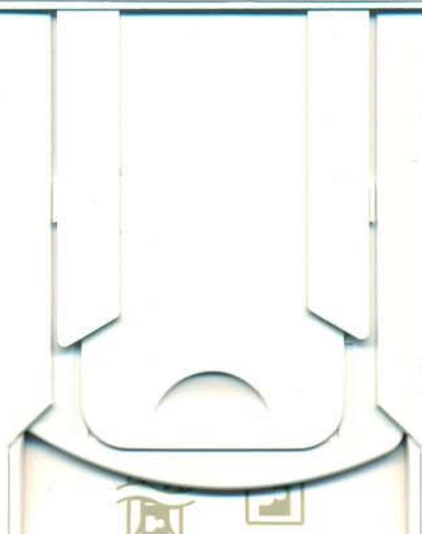
2

Los PELIGROS VOLCÁNICOS

asociados con el
Cayambe

Instituto Geológico, Departamento de Geología
Escuela Politécnica Nacional

El Instituto Geológico, Departamento de Geología de la Escuela Politécnica Nacional, es una institución de investigación científica y tecnológica en el campo de la geología, geología estructural, geología económica, geología ambiental y geología del paisaje. A partir de 1970, mediante Decreto Presidencial, pasó a cargo del Estado la gestión de la investigación y la enseñanza en geología, lo que permitió la creación de la Escuela Politécnica Nacional y la consolidación de la investigación geológica en el país. El Instituto Geológico, Departamento de Geología, es una institución de investigación científica y tecnológica en el campo de la geología, geología estructural, geología económica, geología ambiental y geología del paisaje. A partir de 1970, mediante Decreto Presidencial, pasó a cargo del Estado la gestión de la investigación y la enseñanza en geología, lo que permitió la creación de la Escuela Politécnica Nacional y la consolidación de la investigación geológica en el país.



IRD

L'institut de recherche pour le développement (IRD; Instituto francés de Investigación para el desarrollo), es un establecimiento público de carácter científico y tecnológico, auspiciado por los ministerios de Investigación y Cooperación de Francia.

EL IRD realiza investigaciones conjuntamente con otras instituciones francesas, europeas e internacionales, siempre en cooperación con organismos asociados en la zona intertropical, en África, América Latina, Asia y en los océanos Índico y Pacífico.

El IRD tiene una representación en el Ecuador desde 1974, y cuenta con una tradición importante de investigación en el Ecuador, en varios campos. Actualmente, investigadores de tres departamento científicos del IRD trabajan en Ecuador.

El departamento Medios y Entornos, desarrolla investigaciones sobre la variabilidad climática tropical, las interacciones entre el océano y la atmósfera, los medio litorales y terrestres y los recursos hídricos, los riesgos naturales, los recursos minerales y el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente.

El departamento Recursos Vivos se dedica al estudio de la biodiversidad, de los ecosistemas acuáticos y de los agrosistemas tropicales con el fin de garantizar la variabilidad de su explotación mediante un manejo apropiado.

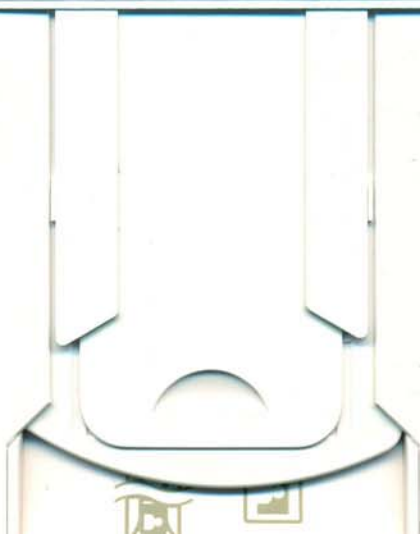
El departamento Sociedad y Salud realiza programas de investigación sobre la salud, las cuestiones urbanas, las dimensiones económicas, sociales y culturales del desarrollo y sobre el estado de las ciencias en el África.

Instituto Geofísico/ Departamento de Geofísica Escuela Politécnica Nacional

El Instituto Geofísico/Departamento de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional constituye el primer centro de investigación sísmica y volcánica existente en el país. A partir de enero de 2003, mediante Decreto Presidencial, tiene a cargo en forma oficial el diagnóstico y vigilancia de los peligros sísmicos y volcánicos en todo el territorio nacional y a la vez la comunicación oportuna de estos fenómenos.

Conjuntamente con el diagnóstico de la amenaza, el Instituto Geofísico mantiene un activo programa de monitoreo instrumental en tiempo real, que asegura la vigilancia científica permanente sobre volcanes activos y fallas tectónicas en el territorio nacional. Una serie de publicaciones tanto científicas como de divulgación general a nivel nacional e internacional, dan fe de la capacidad y mística de trabajo de los científicos y técnicos que conforman el Instituto.

A lo largo de su corta vida, el Instituto Geofísico se ha hecho acreedor a importantes premios y reconocimientos, a nivel local e internacional, por su trabajo en el diagnóstico y prevención de los desastres naturales. En 1992, el Premio SASAKAWA, otorgado por las Naciones Unidas y, varios reconocimientos y condecoraciones por parte del Ilustre Municipio de Quito (1999), del Honorable Congreso Nacional (2000) y del Gobierno de la Provincia de Pichincha (2003).



Serie:

Los peligros volcánicos
en el Ecuador

Los PELIGROS VOLCÁNICOS

2 asociados con el Cayambe

Pablo Samaniego
Jean-Philippe Eissen
Michel Monzier
Claude Robin
Alexandra Alvarado
Hugo Yepes



IG
INSTITUTO GEOFÍSICO DE LA
ESCUELA POLITÉCNICA
NACIONAL



**Institut de recherche
pour le développement**

IRD
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT



**CORPORACIÓN
EDITORIA NACIONAL**

Octubre 2004

Serie:
Los peligros
volcánicos
en el Ecuador
2

Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe

Pablo Samaniego¹, Jean-Philippe Eissen^{2/3},
Michel Monzier³, Claude Robin³, Alexandra
Alvarado¹, Hugo Yepes¹

- 1 Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional
Ladrón de Guevara s/n, Ap. 17-01-2759, Quito, Ecuador
- 2 Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
Whymper 442 y Coruña, Ap. 17-12-857, Quito, Ecuador
- 3 Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UR 031
Laboratoire "Magmas et Volcans", 5 rue Kessler, 63038
Clermont-Ferrand, Francia

Impreso y hecho en Ecuador
Printed and made in Ecuador

© Corporación Editora Nacional
ISBN 9978-84-367-1
Derechos de autor: 020272
Depósito legal: 002740
31 de agosto de 2004

Supervisión editorial: Jorge Ortega
Diseño gráfico: Edwin Navarrete
Impresión: Editorial Ecuador

Foto de la portada: El flanco norte del volcán Cayambe.
(Foto: P. Samaniego, IG-EPN)
Foto de la contraportada: El flanco occidental del volcán
Cayambe (Foto: M. Monzier, IRD/IG-EPN)

Corporación Editora Nacional
Roca E9-59 y Tamayo, teléfonos 593(2)255 4358,
fax 593(2)256 6340, apartado postal 17-12-886
correo electrónico: cen@accessinter.net
Quito - Ecuador

Para más información:
Teléfono: 02 222 5655 • Fax: 02 256 7847
E-mail: geofisico@igepn.edu.ec
Página web: www.igepn.edu.ec

Este libro está publicado con el apoyo financiero de la DIC
(Délégation à l'Information et à la Communication)
del IRD (Institut de Recherche pour le Développement-Instituto
Francés de Investigación para el Desarrollo).



Contenido

Agradecimientos	7
Dedicatoria	9
Los volcanes en el Ecuador	10
• Láminas en color 1	12
1. Introducción	13
2. Historia geológica del volcán Cayambe	19
El edificio basal: el viejo Cayambe	
El edificio actual: el nevado Cayambe	
El cono satélite: el Cono de la Virgen	
La actividad reciente (últimos miles de años) del volcán	
3. Tipos de fenómenos volcánicos observados en el volcán Cayambe	27
Caída de piroclastos	
• Láminas en color 2	30
Domos y flujos de lava	
Flujos piroclásticos (nubes ardientes)	
Flujos de lodo y escombros (lahares)	
Gases volcánicos	
Sismos volcánicos	
4. Monitoreo volcánico	51
Vigilancia por observación	
Vigilancia instrumental	
El monitoreo volcánico realizado por el IG	
La actividad actual del Cayambe	
5. Posibles escenarios eruptivos en caso de una reactivación del volcán Cayambe	61
Referencias	66
Glosario	69
Anexo 1. Algunos problemas asociados con las caídas de ceniza volcánica	79
Anexo 2. Índice de explosividad volcánica	84
Anexo 3. Testimonio histórico	85
Anexo 4. Los andinistas y los volcanes ecuatorianos	88
Anexo 5. Datación por el método de Carbono-14	91

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a :

- La DIC (*Délégation à l'Information et à la Communication*) del IRD (*Institut de Recherche pour le Développement-Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo*) por el apoyo financiero que hizo posible la publicación de este folleto.
- El IRD por el constante apoyo al IG en el campo de la volcanología.
- La Escuela Politécnica Nacional por el constante apoyo al funcionamiento del Instituto.
- El programa de Asistencia para crisis volcánicas (VDAP) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), financiado por OFDA/USAID, por su constante y desinteresado apoyo en la parte instrumental y en la interpretación científica de los datos.
- Al Ilustre Municipio de Cayambe y al Gobierno de la Provincia de Pichincha por el apoyo al monitoreo instrumental del volcán Cayambe.
- La Ing. Patricia Mothes (IG) por proporcionar gentilmente una muestra de carbón encontrada en un flujo de lodo de la planicie de Cayambe.
- La Srta. Anne Rose de Fointainieu (IFEA-*Université de Paris*) por los comentarios relacionados con los estudios arqueológicos realizados en la planicie de Cayambe.
- Finalmente a todos los miembros del Instituto Geofísico por su absoluta dedicación en el mantenimiento de las redes de monitoreo del IG. Las personas que bajo la dirección del Ing. Hugo Yepes permiten un monitoreo permanente del volcán son :
 - Área técnica:
Ing. Wilson Enriquez López, Msc (Jefe de área), Ing. Mayra Vaca, Físico Omar Marcillo, Tlgo. Vinico Cáceres, Tlgo. Cristian Cisneros, Físico Jorge Aguilar, Ing. Marisol León, Tlgo. Eddy Pinajota, Sr. Kleber Terán, Sr. Santiago Arellano, Sr. Andrés Cadenas, Sr. Sandro Jua, Ing. Cristina Ramos*, Ing. Daniel Cárdenas*, Ing. Richard Jaramillo, Msc*.
 - Área de sismología:
Ing. Alexandra Alvarado, Msc (Jefe de área), Ing. Mónica Segovia, Geol. Indira Molina, Geol. Alexander García Aristizabal, Sra. Liliana Troncoso, Sr. Guillermo Viracucha, Sr. Pablo Cobacan-

go, Sr. Sandro Vaca, Srta. Mercedes Taipe, Ing. Mario Ruiz Msc*, Ing. Darwin Villagomez*, Ing. Alcinoe Calahorrano, Msc*.

- Área de vulcanología:

Dr. Pablo Samaniego (Jefe de area), Dr. Minard L. Hall, Ing. Patricia Mothes, Msc., Ing. Patricio Ramón, Ing. Gorki Ruiz, Ing. Daniel Andrade, Msc., Dr. Jean Philippe Eissen (IRD), Dr. Jean-Luc Le Pennec (IRD), Dr. Michel Monzier (IRD), Ing. Silvana Hidalgo, Msc.*, Sr. Diego Barba, Sr. David Rivero, Sr. Daniel Bausalto, Sr. Patricio Zamora.

- Área de secretaría y servicios:

Sra. Marcela de Robalino, Srta. Sandra Jimenez, Srta. Gabriela Jácome, Sr. Carlos Ayol, Sr. Servilio Riofrio.

Adicionalmente, los autores expresan sus agradecimientos a los estudiantes que aseguran la vigilancia las 24 horas del día los 365 días del año:

Nayda Terán, Roberto Vásconez, Roberto Villalba, Juan Carlos Santana, Marco Loaiza, Wilmer Vaca, Dayanara Hinojosa, Gabriela Taipe, Mario Guzmán, Cristian Correa.

* Personal del IG que se encuentra realizando estudios de post-grado en el extranjero.

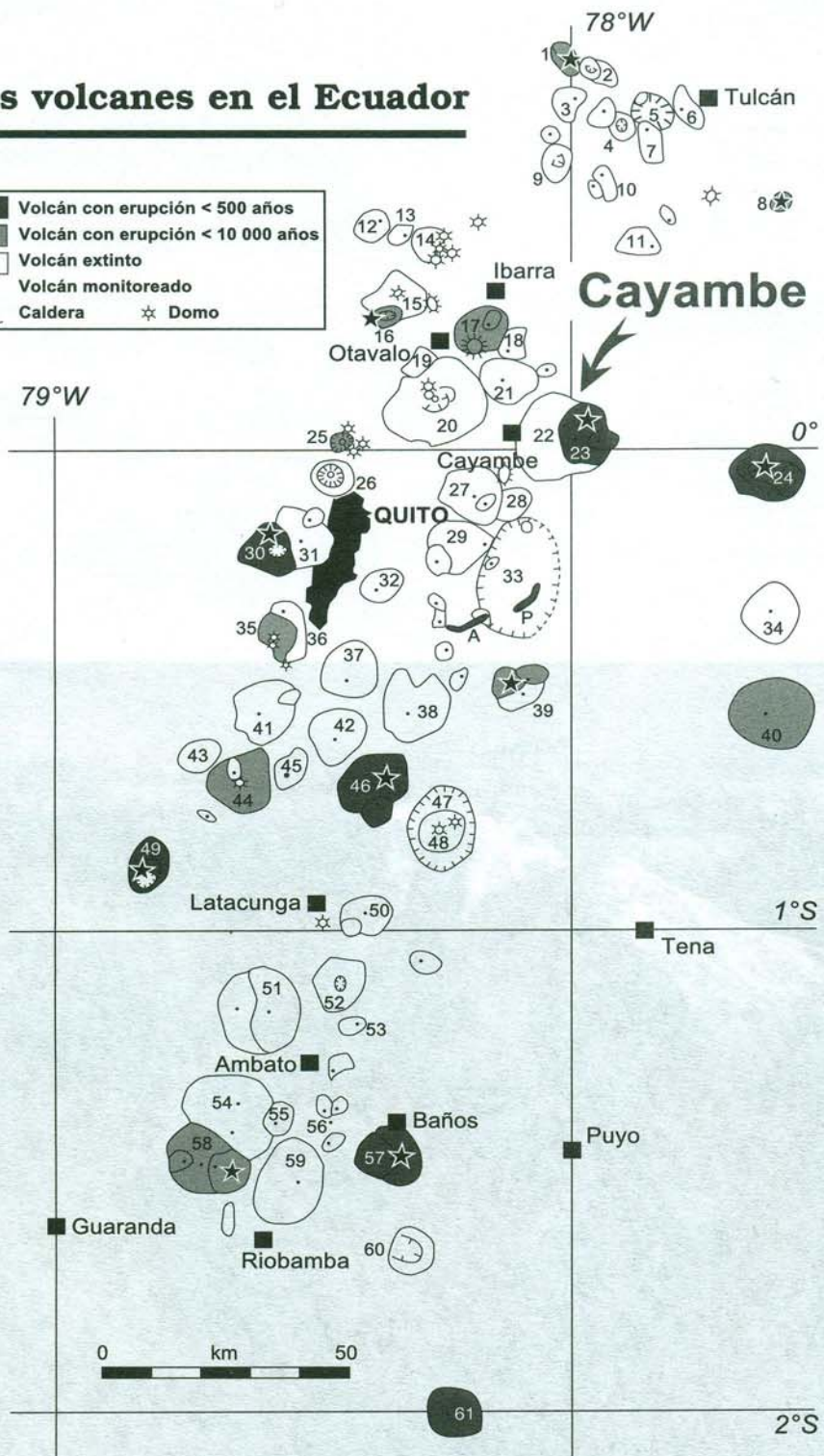
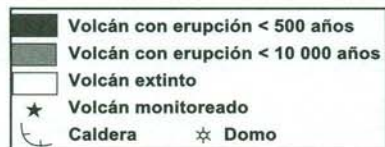
Dedicatoria

Esta obra la dedicamos a la memoria de nuestro amigo y colega *Michel Monzier*, uno de los mayores conocedores de la historia eruptiva del Cayambe en particular y de los volcanes ecuatorianos en general.

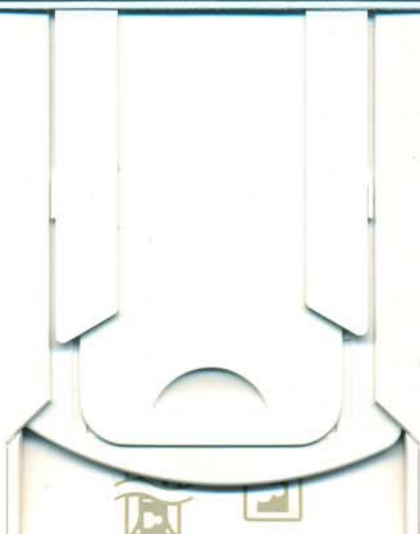
- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 1. Cerro Negro de Mayasquer | 33. Caldera de Chacana |
| 2. Chiles | - Antisanilla (1760) |
| 3. Peña Blanca (Chiltazón) | - Porterillo/Papallacta (1773) |
| 4. Potrerillos | 34. Pan de Azúcar |
| 5. Caldera de Chalpatán | 35. Niñahuilca |
| 6. Chulamuez | 36. Atacazo- |
| 7. Horqueta | 37. Paschoa |
| 8. Soche | 38. Sincholagua |
| 9. Igúan | 39. Antisana |
| 10. Chaquilulo (Azufra) | 40. Sumaco |
| 11. Mangus | 41. Corazón |
| 12. Pilavo (Negropuno) | 42. Rumiñahui |
| 13. Yanaurcu | 43. Almas Santas |
| 14. Huanguillaro (Huagrabola) | 44. Illiniza |
| 15. Cotacachi | 45. Santa Cruz |
| 16. Cuicocha | 46. Cotopaxi |
| 17. Imbabura | 47. Caldera de Chalupas |
| 18. Cubilche | 48. Quilindaña |
| 19. Cushnirumi | 49. Quilotoa |
| 20. Mojanda - Fuya Fuya | 50. Santapungo (Chinibano) |
| 21. Cusín | 51. Sagoatoa (Saguatoa) |
| 22. Viejo Cayambe | 52. Larcapungo |
| 23. Nevado Cayambe | 53. Huicutambo |
| 24. El Reventador | 54. Carihuairazo |
| 25. Pululagua (Pululahua) | 55. Puñalica |
| 26. Casitagua | 56. Huisla |
| 27. Pamba Marca | 57. Tungurahua |
| 28. Izambi | 58. Chimborazo |
| 29. Puntas | 59. Igualata |
| 30. Guagua Pichincha | 60. Altar / Capac Urco |
| 31. Rucu Pichincha | 61. Sangay |
| 32. Ilaló | |

Figura 1. *Los volcanes del Ecuador.* La cadena de los Andes en el Ecuador está constituida por más de 50 volcanes entre los cuales tenemos ocho volcanes considerados como activos (con, al menos, una erupción durante los tiempos históricos –posterior a la conquista española–, es decir en los últimos 500 años); y, 10 volcanes considerados como potencialmente activos (con, al menos, una erupción en los últimos diez mil de años).

Los volcanes en el Ecuador



Los volcanes en el Ecuador



1. Introducción

El volcán Cayambe¹ (Latitud 00° 1.72' Norte; Longitud 77° 59.13' Oeste; altura 5 790 m; figura 1) se encuentra ubicado en la parte Norte de la Cordillera Real de los Andes Ecuatorianos, a 60 km al Nor-Oriente de la ciudad de Quito y a tan solo 15 km al Oriente de la ciudad de Cayambe (figura 2). La ciudad de Cayambe, con aproximadamente 20 000 habitantes, está asentada en una fértil llanura ubicada inmediatamente al occidente del volcán, a una altura de 2 800-3 000 metros sobre el nivel del mar (msnm), la cual se extiende entre los ríos La Chimba y Granobles al Norte y Occidente y Guachalá al Sur. La fertilidad de esta llanura ha permitido el desarrollo de una agricultura intensiva dedicada fundamentalmente a la floricultura y a la producción lechera. En el pasado, estas mismas características permitieron la ocupación temprana de la llanura, la cual formó parte de territorio Caranqui, grupo humano del período de integración (último período pre-incaico), que comprende el período de tiempo entre 700 y 1 450 años DC. El territorio Caranqui, delimitado al norte por los ríos Chota y Mira y al sur por el río Guayllabamba, presenta rasgos geográficos remarcables, relacionados con la explotación agrícola y con las costumbres de los antiguos habitantes de estas tierras. En efecto, el estudio de fotografías aéreas (en particular las fotos del IGM, 1965, antes de que en esta zona se desarrolle la agricultura intensiva), así como de excavaciones arqueológicas (Gondard & Lopez, 1983; Villalba, 1999), han permitido poner en evidencia la existencia de diferentes formas de explotación de las tierras laborables: se habla de montículos artificiales o “tolas”, de amplias superficies elevadas dedicadas a la explotación agrícola denominadas “campos elevados”, de zurcos o “camellones” y de redes de canales para la

1 El nombre Cayambe proviene de *Cayan-buru* que en lengua Cayanqui-Caranqui significa “Montaña del Sol” (Guaña, 2002).

circulación del agua. Todas estas estructuras agrícolas sugieren un alto grado de desarrollo de los antiguos habitantes de estas tierras.

El Cayambe es un *volcán*² activo de la Cordillera Real u Oriental de los Andes Ecuatorianos. Si lo observamos desde el Occidente (figuras 3, 4) observamos que se trata de un cono con pendientes fuertes y que culmina en una cima de forma plana (la cumbre máxima). Sin embargo, si se lo observa desde el Norte (por ejemplo desde la Laguna de San Marcos, figura 5), observamos que se trata de un *volcán compuesto*, formado por varias cumbres, entre las que se destacan la cumbre máxima (5 790 m snm), la más occidental y una cumbre secundaria u Oriental (5 487 m snm), ubicada a solo 1.5 km al Oriente de la cumbre máxima. Otra característica importante del Cayambe es que no existe un *cráter* visible, lo cual se explica por el tipo de erupciones que han ocu-

2 Todos los términos en *itálicas* se encuentran definidos en el Glosario.

Figura 3. El flanco Occidental del volcán, en cuyas faldas se encuentra la ciudad de Cayambe. Fotografía: M. Monzier, IRD.





Figura 4. La cumbre del volcán Cayambe vista desde el valle del río Blanco al occidente del volcán. Fotografía: P. Samaniego, IG.

rrido en este volcán: en cada ocasión se abre una nueva *chimenea* o conducto volcánico, el cual al final del ciclo eruptivo es sellado por el nuevo magma que se enfría en el cráter, formando lo que se denomina un *domo* de lava.

Sobre los 4 800 m snm, el volcán está cubierto por un importante casquete glaciar que cubre un área aproximada de 22 km² y que alcanza un espesor de alrededor de 30 a 50 m en la cumbre. Grandes lenguas glaciares descienden desde este casquete hasta alturas de 4 400 msnm en el flanco Oriental, más húmedo por acción de los vientos provenientes de la Amazonía; y a tan solo 4 800-5 000 msnm en el flanco Occidental.

El Complejo Volcánico Cayambe cubre un área de 24 km en dirección Este-Oeste por 18 km en dirección Norte-Sur (figura 6), constituyendo uno de los más grandes complejos volcánicos del arco ecuatoriano. Desde el punto de vista morfológico, existe una división clara entre la parte occidental y la parte oriental del complejo volcánico. En efecto, la mitad occidental se caracteriza por pendientes suaves y valles profundos producto de una intensa erosión glaciar. Por



Figura 5. El flanco Norte del Cayambe. Se observa la cumbre máxima y la cumbre oriental. Fotografía: M. Monzier, IRD.

el contrario la mitad oriental se caracteriza por tener pendientes más acentuadas y en general una topografía más accidentada. Este contraste sugiere claramente una diferencia en edad entre las dos partes: la parte occidental está constituida por los restos de un antiguo volcán ahora extinto; mientras que la mitad oriental, incluyendo la cumbre máxima corresponde al edificio joven, es decir el volcán potencialmente activo.

El volcán se encuentra drenado por dos sistemas fluviales diferentes, dirigidos hacia el Occidente (río Pisque) y hacia el Oriente (río Salado). La existencia de estos dos sistemas de drenaje tiene, como se discutirá más adelante, implicaciones

Figura 6. Mapa topográfico y toponímico del volcán Cayambe. Todas las localidades mencionadas en el texto están incluidas en esta figura. Curvas de nivel cada 200 metros. Fuente: IGM, 2002.

en la delimitación de las zonas potencialmente afectadas por una erupción de este volcán. Las quebradas de la parte Nor-Occidental forman el río La Chimba que luego tomará los nombres de San José y posteriormente Granobles. La parte Sur-Occidental del volcán está limitada por el río Guachalá, el cual recibe los aportes de los numerosos drenajes de este sector, entre las que destaca el río Monjas. Entre los valles de la parte Occidental destaca el profundo valle del río Blanco que desciende directamente de la cumbre del volcán, que atraviesa la ciudad de Cayambe y que desemboca en el río San José, el cual toma a partir de este punto el nombre de Granobles. La unión de los ríos Granobles y Guachalá ocurre al Sur de la planicie de Cayambe, dando origen al río Pisque que posteriormente formará el río Guayllabamba. Por otro lado, las quebradas de la parte Norte y Nor-Oriental del volcán, que drenan las partes jóvenes del mismo, forman el río Azuela; mientras que las quebradas de la parte Sur-Oriental forman el río Huataringo. La unión de estos dos drenajes da origen al río Salado, el cual se dirige hacia la Amazonía para formar luego el río Quijos y posteriormente el río Coca.

Previo a los trabajos de Hall y Mothes (1994) se consideraba a este gran edificio volcánico como inactivo. Sin embargo, estos autores reportaron varios niveles de ceniza volcánica que los asociaron con la actividad del volcán durante el Holoceno (últimos 10 000 años). Posteriormente, estudios geológicos más recientes (Samaniego, 1996; Monzier *et al.*, 1996; Samaniego *et al.*, 1998; Samaniego, 2001) permitieron conocer la historia geológica de este importante y poco conocido volcán. En base a estos estudios, se ha podido definir que las erupciones pasadas de este volcán se han caracterizado por la formación de *domos o flujos de lava* en la parte superior del volcán; *flujos piroclásticos* que cubrieron los flancos Norte y Oriental del mismo; *flujos de lodo y escombros (lahares)* que viajaron por los ríos al Oriente y al Occidente; *caídas de lapilli y ceniza* que han acompañado casi todas las erupciones pasadas y han cubierto especialmente la parte superior del volcán; y de manera muy ocasional *avalanchas de escombros* que han afectados los flancos Norte y Occidental del volcán en épocas remotas.

2. Historia geológica del volcán Cayambe

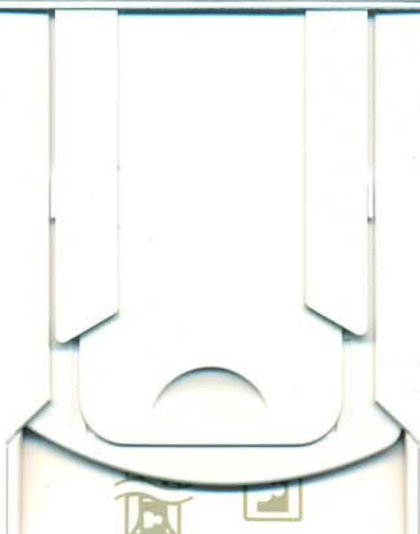
El Complejo Volcánico Cayambe esta constituido por dos edificios volcánicos sucesivos y un pequeño cono satélite ubicado en la extremidad oriental del complejo.

■ EL EDIFICIO BASAL: el "Viejo Cayambe"

La parte occidental del complejo, es decir la parte junto a la planicie de Cayambe, está constituida por los restos erosionados de un antiguo volcán, denominado el "Viejo Cayambe" (figura 7). Este volcán, que alcanzó una altura de al menos 4 500 m snm, está constituido por una sucesión de flujos de lava, mayoritariamente de composición *andesítica*. El final de este edificio estuvo marcado por una serie de eventos de volcanismo más *silíceo*, en especial la formación de importantes flujos de lava de composición *dacítica* en la parte Sur-Occidental y una importante actividad piroclástica de composición *riolítica*, que originó la formación de una *caldera* en la parte central del edificio. En base a varias *dataciones radiométricas*, se ha podido estimar que este edificio fue construido por la acumulación de los productos volcánicos de erupciones sucesivas ocurridas durante el *Pleistoceno*, hasta hace aproximadamente 1 000 000 de años antes del presente (AP).

El edificio actual: el "Nevado Cayambe"

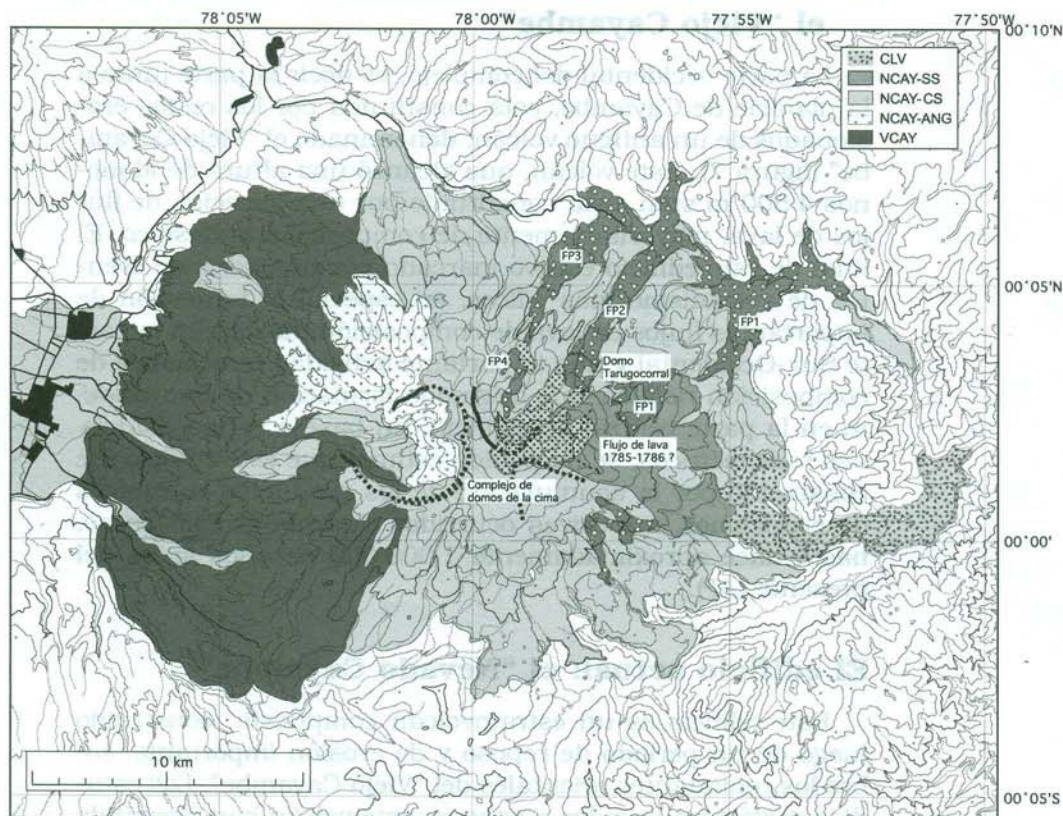
Este edificio es un estratovolcán compuesto, construido luego de un período de reposo y de erosión importante, sobre los remanentes orientales del "Viejo Cayambe". Los estudios geológicos llevados a cabo en este volcán han permitido



determinar que su actividad se inicio hace aproximadamente 400 000 años antes del presente (AP).

El inicio de ésta actividad estuvo marcado por la construcción de un edificio volcánico que marcó la transición entre el antiguo y el nuevo volcán (este volcán se ha denominado el Cono de El Angureal, figura 7). Los vestigios de este edi-

Figura 7. Mapa geológico simplificado del volcán Cayambe (modificado de Samaniego et al., 2004). VCAY: Viejo Cayambe; NCAY-ANG: Cono de El Angureal; NCAY-CS: Cumbre Máxima del Nevado Cayambe; NCAY-SS: Cumbre Secundaria del Nevado Cayambe; CLV: Cono de La Virgen. Se observa también en la figura los domos y los flujos piroclásticos (FP1-4) asociados con la actividad reciente del volcán.



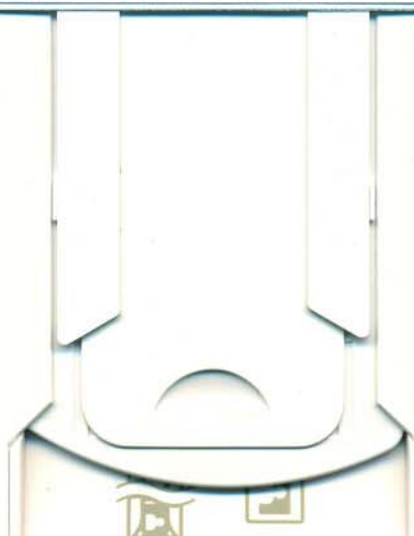
ficio son escasos, pues han sido erosionados o cubiertos por los productos volcánicos posteriores. A continuación se desarrolló el edificio que constituye la cumbre máxima (5 790 m) del complejo (figura 7), el cual es un estratovolcán coronado por un complejo de domos en la cumbre. Este edificio ha presentado diferentes fases de construcción (emisión de *flujos y domos de lava*) y de destrucción del edificio (erupciones *piroclásticas* altamente explosivas y *colapsos sectoriales*). En particular se debe señalar la ocurrencia de dos colapsos sectoriales que afectaron los flancos Occidental y Norte. El colapso del flanco occidental se evidencia por la estructura en forma de herradura de la cabecera del río Blanco y los depósitos de avalancha y de *flujos de escombros* que cubren la planicie de Cayambe y que afloran en los valles de los ríos Blanco, Granobles y Guachalá. Por su parte, los productos del colapso del flanco Norte, constituyen el depósito de avalancha del río San Pedro, junto a la laguna de San Marcos. Finalmente, un tercer edificio, que forma la cumbre secundaria o cumbre Oriental (5 487 m), fue construido sobre el flanco Oriental del edificio precedente (figura 6). Este edificio no fue afectado por la erosión glaciaria por lo que se le asigna una edad Holocena (menor a 10 000 años AP).

Un cono satélite: el Cono de La Virgen

En el extremo oriental del Complejo Volcánico Cayambe, se encuentra un pequeño edificio satélite, denominado el Cono de La Virgen (3 882 m snm, figura 7). Este cono tiene una edad Holocénica y fue el responsable de la emisión de una muy importante serie de flujos de lava que viajaron cerca de 12 km hacia el Oriente, llenando el valle del río Huataringo.

La actividad reciente (últimos miles de años) del volcán

La actividad reciente del Nevado Cayambe ha sido la responsable de la construcción de la cumbre Oriental y de la formación de varios domos en los flancos Norte y Nor-Orien-



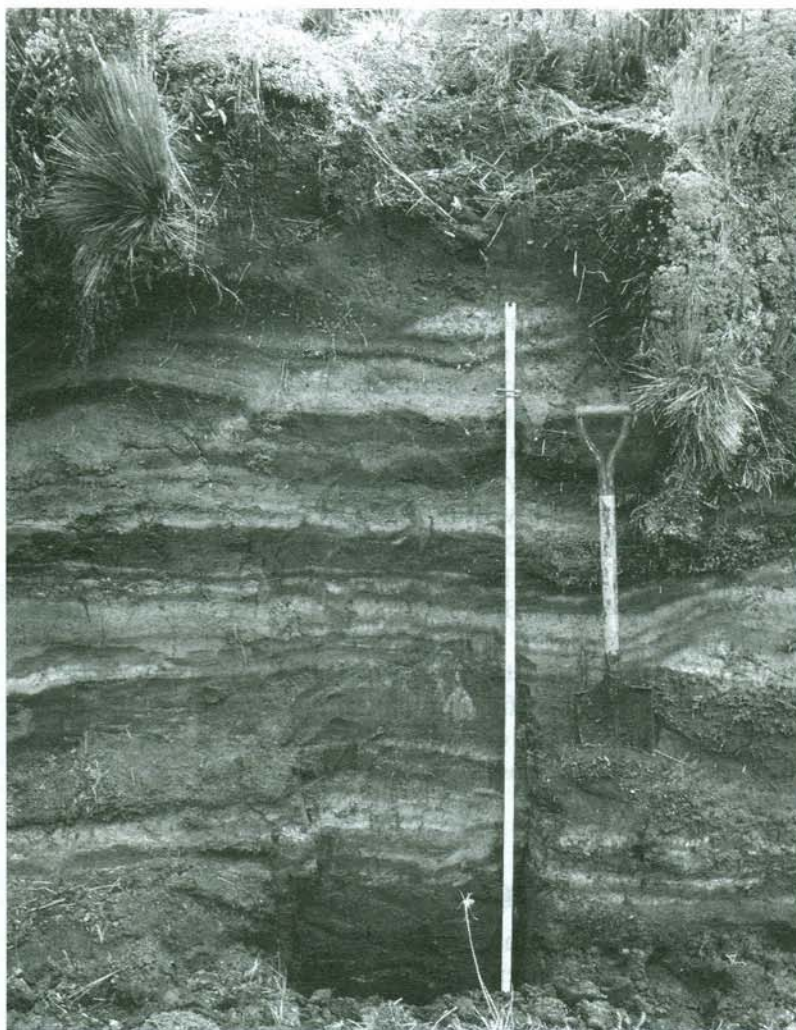


Figura 8. Depósitos de caída de ceniza atrapados en una turbera del flanco Sur-Occidental del volcán. Fotografía: M. Monzier, IRD.

tal. De manera general, esta actividad ha sido de tipo *peleano*, es decir se ha caracterizado por el crecimiento y la posterior destrucción de domos de lava. El estudio de los depósitos de caída de ceniza acumulados en una turbera del flanco Sur-Occidental (ubicada en el valle glaciar justo antes del Refugio) ha sido ampliamente instructiva para reconstruir la

historia eruptiva del Cayambe. En general, las turberas son muy útiles para los vulcanólogos pues por un lado son excelentes sitios de acumulación de la ceniza; y, por otro, la abundancia de materia orgánica hace posible que se puedan obtener dataciones radiométricas por el método del ^{14}C (Anexo 5). En esta turbera se han identificado 18 a 20 erupciones ocurridas durante los últimos 4 000 años (figuras 8 y 9). Estas erupciones están distribuidas en tres períodos de actividad volcánica, los mismos que están separados por períodos de reposo (figuras 9 y 10). El primero de estos períodos se prolongó entre 3 800 y 3 500 años AP (1 850 AC-1 550 AC), el segundo entre 2 500 y 1 700 años AP (550 AC-250 DC) y el tercero de estos períodos eruptivos se inició hace 1 100 años (850 DC). El último de estos períodos se caracterizó por el crecimiento de domos de lava en la parte superior de los flancos Norte y Nor-Oriental, la generación de *flujos piroclásticos* producidos por el colapso de estos domos, la producción de *lahares* asociados a la fusión del casquete glaciar y una limitada distribución de piroclastos. Las erupciones de este período se consideran las más importantes de la historia reciente del volcán. Finalmente, la última erupción del Nevado Cayambe, como lo atestigua un reporte encontrado en la correspondencia de Alexander von Humboldt (Ascásubi, 1802), ocurrió en los años 1785-1786 (ver Anexo 3). Según este reporte, la erupción se habría producido en la parte oriental del complejo, y se describe como una erupción *subglaciar* que habría producido emisiones de ceniza responsables de una caída moderada de ceniza fina en el pueblo de Cayambe y que habría terminado con un flujo de lava o un lahar en 1786. El hecho de que se trató de una erupción de tamaño pequeño a moderado y que se produjo en el flanco oriental, completamente deshabitado, puede explicar la escasez de reportes escritos de la misma y que la memoria oral de este evento haya sido completamente olvidada.

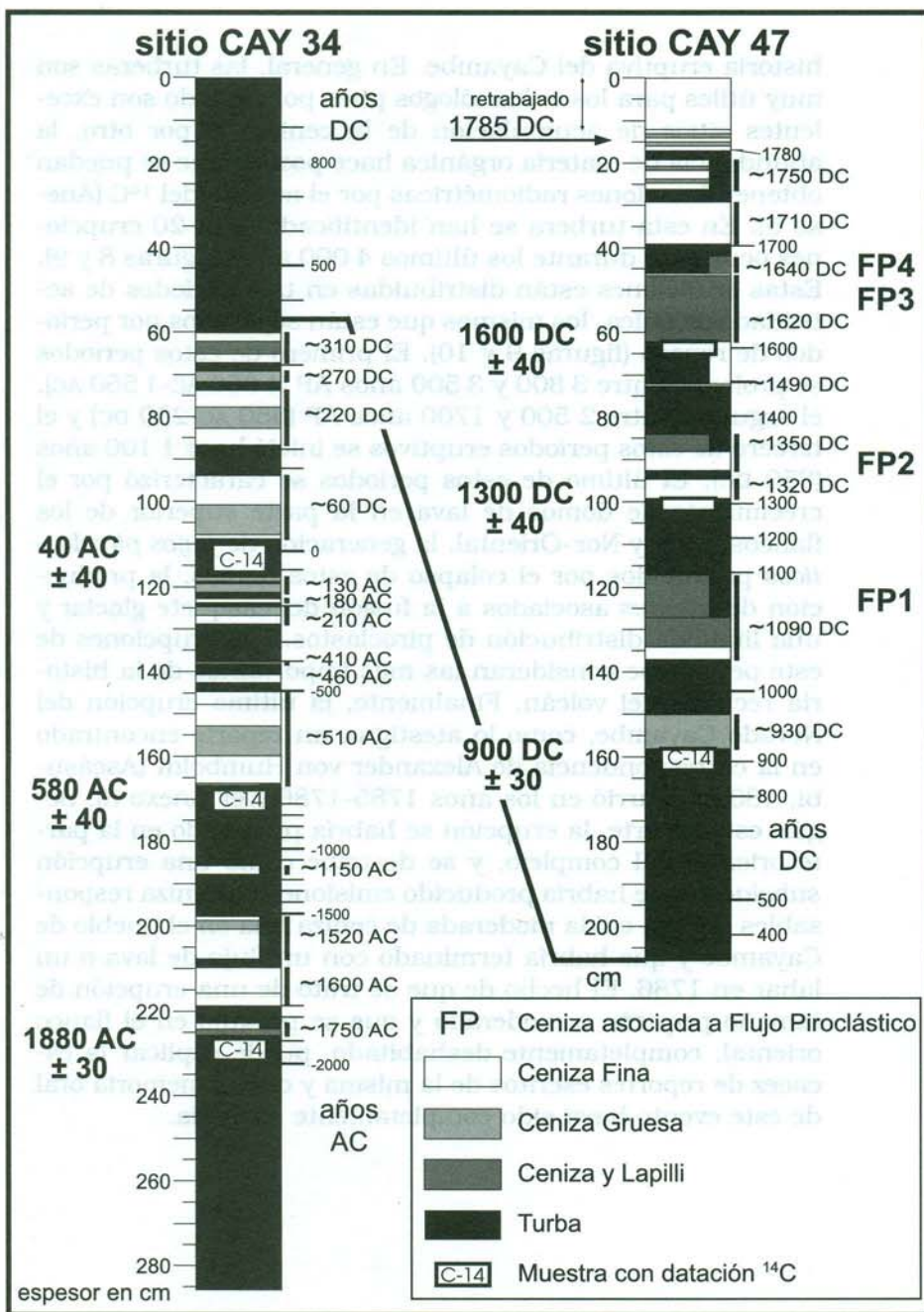


Figura 9. Columna estratigráfica levantada en el sector de la Turbera (ver figura 7). Cada capa de ceniza corresponde a un evento eruptivo del volcán. Modificado de Samaniego *et al.* (1998).

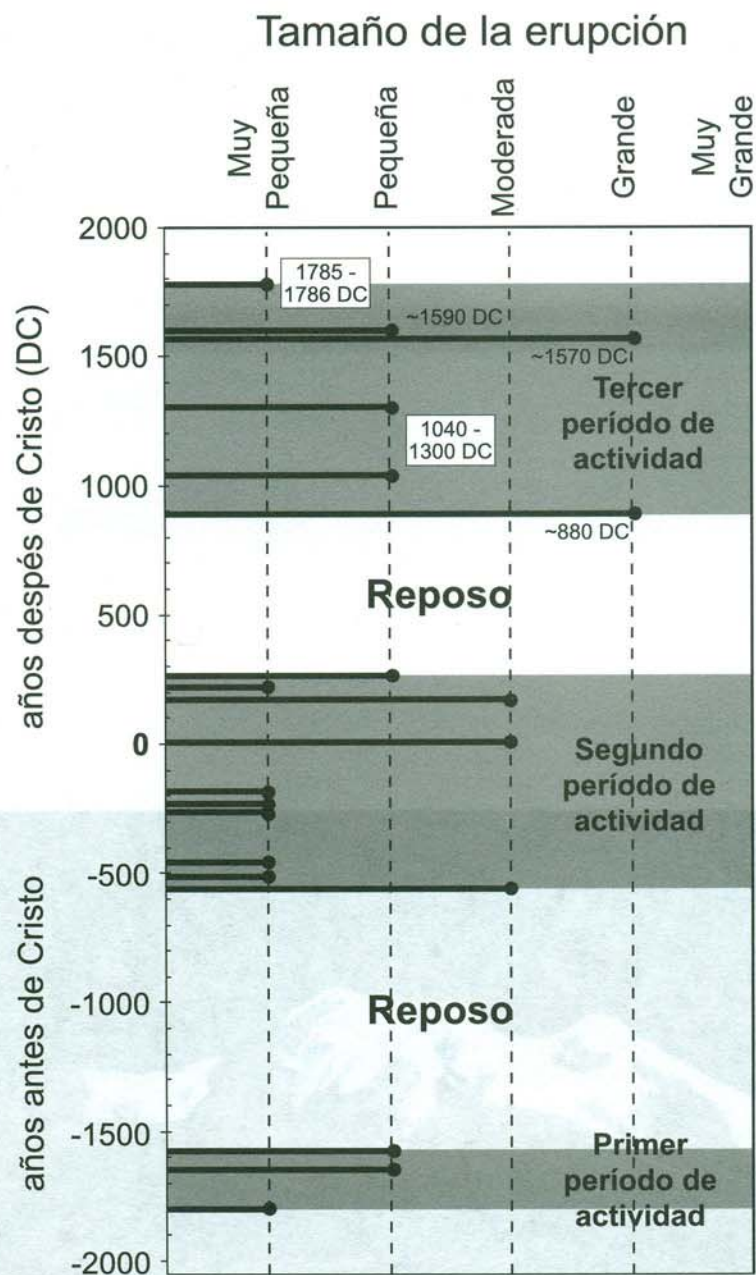
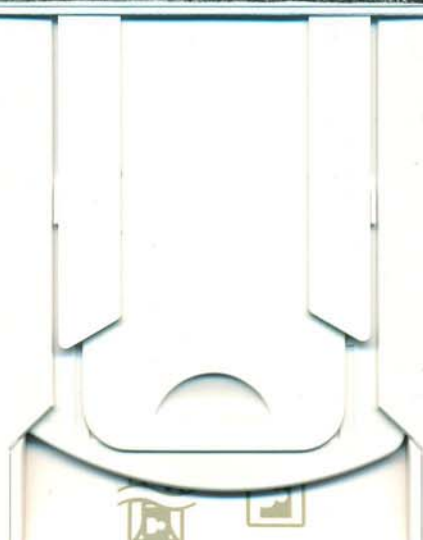
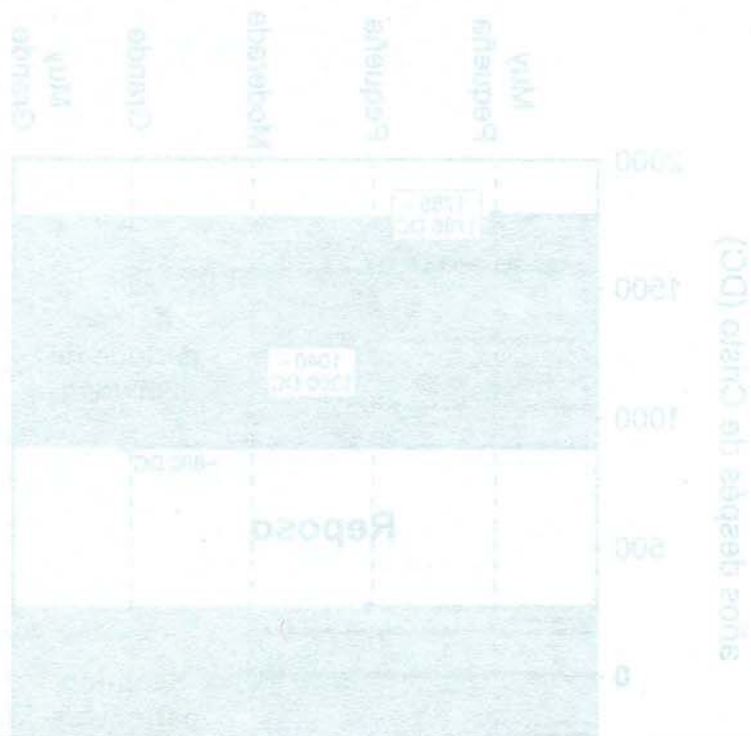


Figura 10. Cronología reciente del volcán Cayambe (AC = Antes de Cristo; DC = Después de Cristo). Modificado de Samaniego et al. (2002).

Tamaño de la erupción



3. Tipos de fenómenos volcánicos observados en el volcán Cayambe

■ CAÍDA DE PIROCLASTOS

Durante una erupción volcánica los gases y el material piroclástico (ceniza, fragmentos de roca y piedra pómez) son expulsados desde el cráter. Los fragmentos más grandes siguen trayectorias balísticas y caen cerca del volcán, mientras que las partículas más pequeñas (es decir la ceniza volcánica) pueden subir a alturas mayores en las columnas eruptivas y pueden ser llevadas por el viento y caer a mayor distancia del volcán, cubriendo grandes áreas con una capa de varios milímetros o centímetros de material piroclástico. Las erupciones que producen piroclastos varían desde explosiones pequeñas, de pocos minutos de duración y que expulsan el material a pocos cientos de metros sobre el cráter (como en las explosiones actuales del volcán Tungurahua o en la erupción del 7 de noviembre de 1999 del volcán Guagua Pichincha), hasta grandes explosiones que pueden durar varias decenas de minutos u horas, y que inyectan material piroclástico a la atmósfera hasta varias decenas de kilómetros de altura (como en la erupción del 3 de noviembre de 2002 del volcán El Reventador).

En las erupciones pasadas del volcán Cayambe, las caídas de ceniza y piroclastos han tenido una distribución limitada a los alrededores del volcán y sus espesores han sido pequeños (figura 11). Sin embargo, dado que la dirección predominante de los vientos en la cordillera es de Oriente a Occidente, se esperarían caídas de ceniza en la parte Occidental del volcán, la cual es una zona densamente poblada. Se debe recordar que volúmenes relativamente pequeños de ceniza (como los emitidos durante la fase eruptiva de agosto de 2001 en el volcán Tungurahua) pueden provocar daños

considerables en los cultivos, así como alterar seriamente la vida de personas y animales (ver Anexo 1).

El material piroclástico cubre una superficie generalmente de forma elíptica, que se puede extender hasta cientos de kilómetros en la dirección del viento, y cuyo espesor disminuye progresivamente desde el volcán. Así, la peligrosidad de este fenómeno estará controlada por el volumen de material emitido, la intensidad y duración de la erupción, la altitud máxima alcanzada por la columna eruptiva, la dirección y la velocidad del viento y la distancia al punto de emisión. En el mapa de peligros volcánicos (figura 12) se presentan las áreas que tienen mayor probabilidad de ser afectadas por las caídas

Figura 11. Capas de piroclastos (de color gris claro en la fotografía), intercaladas con niveles de suelo (de color gris oscuro). Camino al Refugio, flanco Sur-Occidental del volcán. (Fotografía: P. Samaniego, IG).



de piroclastos, en caso de que ocurra una erupción explosiva importante del volcán Cayambe ($VEI \geq 3$, Anexo 2). La curva interna (marcada "20 cm") encierra el área que podría recibir un espesor igual o superior a 20 cm de ceniza. Esta curva incluye básicamente los flancos occidentales del volcán, hasta una altura de aproximadamente 3800 m snm. La curva externa (marcada "1 cm") encierra el área que podría recibir espesores de ceniza superiores a 1 cm; e incluye un área mayor, en la cual se encuentran las poblaciones de Cayambe y Tabacundo, así como otras poblaciones de la parte Occidental. La parte externa a ésta curva recibiría un espesor menor o igual a 1 cm. Adicionalmente, se debe señalar que, en caso de una erupción fuertemente explosiva, todo el valle interandino comprendido entre Ibarra al norte y la ciudad de Quito al sur podría ser afectados por las caídas de ceniza.

Se debe notar que la cantidad de ceniza depende del grado de explosividad de la erupción, así por ejemplo en la erupción de los años 1785-1786, considerada como poco explosiva, las crónicas mencionan un espesor de ceniza en la ciudad de Cayambe del orden de pocos milímetros (ver Anexo 3). Por el contrario, en la parte central de la llanura de Cayambe (Hacienda San Juan), se han encontrado evidencias de "camellones" o zurcos recubiertos por una ceniza fina atribuida a la erupción del volcán Quilotoa (figura 14), ocurrida aproximadamente en el año 1150 DC (aproximadamente 800 años antes del presente, Mothes & Hall, 1998). Estas excavaciones arqueológicas (realizadas como parte del "Proyecto arqueológico Cayambe" auspiciado por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural y el Municipio del cantón Cayambe), testifican el efecto que puede tener las caídas de ceniza sobre la agricultura. En efecto, un depósito pequeño de ceniza (del orden de pocos milímetros) va a afectar los cultivos y los invernaderos, como fue el caso durante la erupción del 3 de noviembre de 2002 del volcán El Reventador; mientras que un depósito de varios centímetros de espesor, como el mostrado en la figura 14, podría destruir total o parcialmente los cultivos y afectar la fertilidad de los suelos por un lapso de tiempo importante (ver Anexo 1).

Figura 12. Mapa de Peligros volcánicos: Caídas de piroclastos y avalanchas de escombros. (1) Área que podría ser afectada por un espesor de ceniza mayor a 20 cm; (2) Área que podría ser afectada por un espesor de ceniza mayor a 1 cm; (3) Área que sería afectada por una avalancha de escombros que afecte el flanco Occidental; (4) Área que sería afectada por una avalancha de escombros que afecte el flanco Norte. (Basado en el Mapa de los peligros potenciales del volcán Cayambe (Modificado de Samaniego et al., 2002).

De lo descrito anteriormente se puede concluir que el impacto de la caída de piroclastos depende principalmente del espesor de material acumulado. La afectación sobre la población empieza a hacerse presente con espesores pequeños, menores a 1 mm de ceniza y se incrementa sustancialmente si la ceniza se mezcla con agua. Los efectos producidos por las caídas de ceniza incluyen problemas de salud (irritación de los ojos y de las vías respiratorias), problemas con el ganado, destrucción de plantas, daños a los motores (vehículos, aviones, maquinarias en general, transformadores, etc.), contaminación de fuentes y reservorios de agua, y en caso de caídas importantes, problemas de visibilidad, riesgos de colapso de los techos, etc. Todos estos efectos, descritos de manera progresiva desde espesores menores a 1 mm hasta mayores a 30 cm están resumidos en el Anexo 1.

Las personas en las áreas afectadas por la caída de material piroclástico, deberán buscar refugio en sus casas u otras edificaciones cercanas, y si permanecen a la intemperie, se recomienda el uso de un casco, de ropa adecuada y de máscaras (o de un pañuelo húmedo) para proteger la boca y la nariz. Se debe además impedir que el ganado consuma hierba contaminada con ceniza, para lo cual sería necesario la evacuación de los animales o su alimentación con hierba limpia traída de otras regiones. Se debe proteger las fuentes y el suministro de agua potable, para evitar que sea contaminada por ceniza. Será necesario limpiar continuamente los techos para evitar la acumulación de ceniza y el posible colapso de los mismos, este trabajo debe ser realizado con suma precaución para evitar la caída desde varios metros de altura.

Figura 13. Mapa de Peligros volcánicos: flujos de lodo y escombros (lahares), flujos piroclásticos y flujos de lava. (1) Área afectada por flujos piroclásticos y flujos de escombros durante las erupciones recientes del volcán; (2) Área potencialmente afectada por flujos piroclásticos, flujos de escombros y flujos de lava en caso de una erupción moderada a grande ($VEI \leq 3$); (3) Área potencialmente afectada por flujos piroclásticos, flujos de lava y flujos de escombros en caso de una erupción grande ($VEI \geq 4$); (4) Área potencialmente afectada por flujos de lodo (asociados con erupciones moderadas a grandes y que desciendan por el río Blanco); (5) Área potencialmente afectada por flujos de lodo (asociados con erupciones muy grandes y que desciendan por el río Blanco). Se debe notar que las zonas no son excluyentes, es decir que el área 2 incluye también al área 3, y que el área 1 incluye a las áreas 2 y 3. Basado en el Mapa de los peligros volcánicos potenciales del volcán Cayambe (Modificado de Samaniego et al., 2002).

■ DOMOS Y FLUJOS DE LAVA

La violencia o el grado de explosividad de una erupción volcánica depende en gran medida del contenido de gases del magma. Si el contenido es bajo, el magma es expulsado de manera efusiva (o poco explosiva), por el contrario si el magma es muy rico en gases, la erupción puede ser altamente explosiva. Así, la formación de domos y flujos de lava son manifestaciones del volcanismo efusivo (figuras 15, 16 y 17). Otro factor que influye en la manera como la lava es emitida desde un cráter es la viscosidad del magma. Si la viscosidad es baja, el magma al llegar a la superficie puede fluir en forma de "ríos" de lava; mientras que si la viscosidad del magma es alta, la lava al salir del cráter se acumulará formando los denominados domos. Los flujos de lava son derrames de roca fundida, originados en un cráter o en fracturas de los flancos del volcán, que descienden por los flancos y las quebradas del mismo a bajas velocidades, del orden de decenas y raramente de centenas de metros por hora, y que pueden alcanzar distancias de hasta varias decenas de kilómetros desde el cráter. Por el contrario, los domos son acumulaciones de lava, originados asimismo en un cráter ubicado en la cumbre o en los flancos superiores del volcán.

La composición química de los magmas de las erupciones recientes del Cayambe muestra que se trata de andesitas síliceas y dacitas, por lo cual los magmas del Cayambe tienen

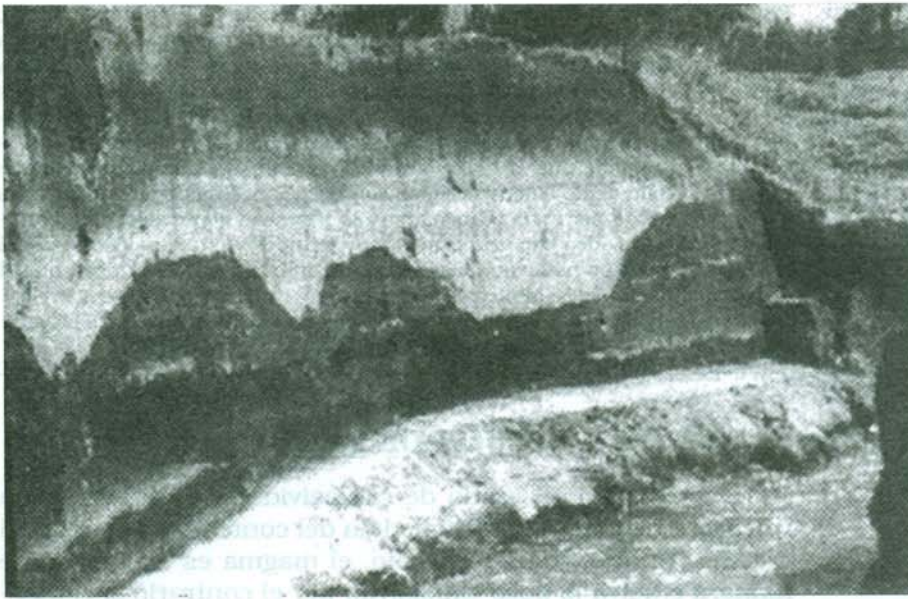


Figura 14. Escavación arqueológica en el sector de la hacienda San Juan (parte central de la llanura de Cayambe), en donde se encontraron "camellones" o zurcos utilizados por los antiguos habitantes de la zona para la agricultura (Villalba, 1998). Estos camellones están rellenos por varias decenas de centímetros de ceniza proveniente de una erupción del volcán Quilotoa ocurrida hace 800 años aproximadamente (Fotografía: F. Villalba).

viscosidades intermedias a altas. Por esta razón, durante la etapa reciente (últimos miles de años) del volcán, se han producido muy pocos flujos de lava, más bien en cada erupción se han formado domos. Por el contrario el "Cono de La Virgen", ubicado en la parte Oriental del complejo volcánico ha producido enormes flujos de lava que han viajado varios kilómetros hacia el Oriente.

Dada la compleja morfología del volcán, con varias cumbres y sin un cráter, durante los últimos miles de años los domos han sido extruidos en diferentes partes de los flancos Norte y Oriental del volcán, razón por la cual se considera

que en caso de una reactivación del mismo serán estos flancos los más propensos a presentar este tipo de actividad. En si la formación de un domo de lava no presenta un peligro directo, sin embargo en volcanes con grandes pendientes, como es el caso del Cayambe, un domo de lava puede volverse fácilmente inestable y colapsar generando flujos piroclásticos de bloques y ceniza que descenderían por los flancos del volcán.

Figura 15. Flujo de lava que se originó en la cumbre Oriental del Nevado Cayambe. Se observan las estructuras del flujo que sugieren que se trata de un flujo muy joven, posiblemente de la erupción de 1785-1786. (Fotografía: M. Monzier, IRD).





Figura 16. Gran flujo de lava del Cono de la Virgen.
(Fotografía: P. Mothes, IG).

■ FLUJOS PIROCLÁSTICOS (NUBES ARDIENTES)

Los flujos piroclásticos son mezclas muy calientes (varios cientos de grados centígrados) de gases, ceniza y fragmentos de roca, que descienden por los flancos del volcán, desplazándose a grandes velocidades y que ocurren generalmente en erupciones grandes y explosivas. Los flujos piroclásticos constan de dos partes; un componente inferior, muy denso, constituido por fragmentos de roca que se desplaza por el fondo de los valles y quebradas; y, un componente frontal, lateral y superior, mucho menos denso pero más voluminoso, constituido por material de menor tamaño (ceniza) y gases, el cual puede sobrepasar los valles y alcanzar alturas importantes sobre su fondo e inclusive sobrepasar relieves



Figura 17. Domo de lava del flanco Nor-Oriental del nevado Cayambe, relacionado con la actividad reciente del volcán. Se estima que se formó durante el ciclo eruptivo de hace 650-950 años AP. (Fotografía: P. Samaniego, IG).

importantes (figuras 18 y 19). En el caso del Cayambe, los flujos piroclásticos se originan generalmente por el colapso de un domo o flujo de lava viscosa formado en uno de los flancos superiores o en la cumbre del volcán. El grado de explosividad de estas erupciones es variable, pudiendo ir desde colapsos poco explosivos inducidos por la destabilización gravitacional (que los vulcanólogos llaman "actividad tipo Merapi", debido a que este tipo de actividad caracteriza al volcán del mismo nombre ubicado en Indonesia) hasta la destrucción total o parcial de un domo por una erupción más explosiva (actividad Peleana, nombre proveniente de la Montagne Pelée, Martinica). Este tipo de actividad eruptiva produce depósitos muy característicos constituidos por bloques y ceniza, muy frecuentes en los flancos Norte y Nor-Oriental del volcán (figura 20).



Figura 18. Domo de lava formado durante la erupción del volcán Guagua Pichincha (1999-2001). El colapso gravitacional de este domo produjo varios flujos piroclásticos que descendieron hacia la parte occidental por el drenaje del río Cristal (Fotografía: Patricia Mothes, IG).

Para delimitar las áreas afectadas por flujos piroclásticos se han utilizado dos metodologías diferentes pero complementarias. En primer lugar, el trabajo de campo que ha permitido identificar los tipos de depósitos (figura 20), su distribución espacial y su alcance desde el volcán. En segundo lugar, se ha aplicado la metodología denominada de "cono de

energía" (Malin y Sheridan, 1982; Tilling, 1993), ampliamente utilizada en la elaboración de mapas de peligros volcánicos alrededor del mundo. Este método considera que el alcance horizontal (L) alcanzado por un flujo piroclástico es función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo y el punto de depositación (figura 21). Así, el ángulo del denominado "cono de energía" corresponde a una medida de la movilidad del flujo. Dado que, en el caso del Cayambe, todos los depósitos de flujos piroclásticos reconocidos corresponden a flujos de colapso de domo, se ha considerado que la altura del colapso (H) es la altura de la cumbre principal del volcán. Por otro lado, utilizando los depósitos piroclásticos mapeados se ha podido medir la distancia máxima (L) alcanzada por los diversos flujos desde la cumbre del volcán, y después determinar la relación H/L para cada evento. Esta proporción corresponde a un ángulo promedio del cono de energía de 12°, el cual es propio de flujos piroclásticos de este tipo (Crandell *et al.*, 1984).

Con estos parámetros se ha definido la zona de color rojo intermedio de la figura 13 que corresponde a la zona de máximo peligro por flujos piroclásticos. Una subdivisión de esta área (zona de color rojo intenso) corresponde al área en la cual se han encontrado depósitos recientes de flujos piroclásticos (es decir en los últimos 4 000 años de actividad del volcán) y por lo tanto la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno se considera mayor. Dado que un evento de este tipo ha ocurrido en promedio una vez cada dos siglos durante los últimos 4 000 años (figura 10), se debe considerar que su probabilidad de ocurrencia en el futuro es alta.

Finalmente, la zona de color rosado pálido (figura 13) corresponde a un evento más explosivo, en el cual los flujos piroclásticos se producirían por el colapso de una columna eruptiva con la generación de flujos de pómez y ceniza (como en la erupción del 3 de Noviembre de 2002 del volcán El Reventador, figura 19). Este tipo de flujos presentan una mayor movilidad, lo cual explica la mayor superficie potencialmente cubierta por estos fenómenos; sin embargo, puesto que el Cayambe no han tenido erupciones de este tipo durante los últimos miles de años, se considera que la probabilidad de

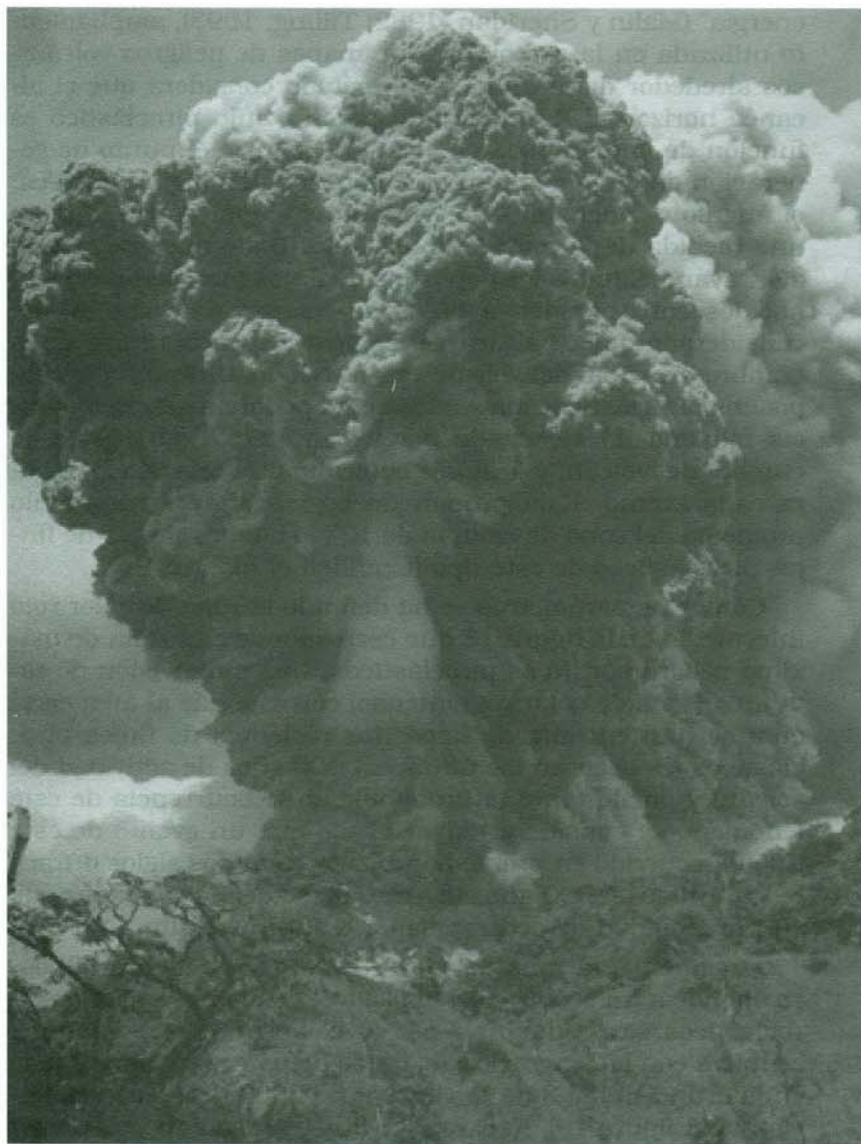


Figura 19. Flujo piroclástico de la erupción del 3 de noviembre de 2002 del volcán El Reventador (Fotografía: L. Saca).

Figura 20. Depósito de un gran flujo piroclástico producido por el colapso de un domo del flanco Norte del volcán. El depósito asociado con este evento, ocurrido hace aproximadamente 400 años, represó el río Azuela, dando origen a la Laguna de San Marcos. (Fotografía: P. Samaniego, IG).



ocurrencia de un fenómeno de este tipo es muy baja (menor a un evento cada 10 000 años).

En el caso de flujos piroclásticos formados por el colapso de un domo, la zona afectada es aquella ubicada pendiente abajo del domo o flujo de lava inestable, siendo en general los flancos Norte y Oriental del volcán, los más expuestos a este fenómeno. Afortunadamente, estos flancos constituyen zonas deshabitadas, por lo que, a pesar que el peligro es importante (es decir la probabilidad de ocurrencia), el riesgo

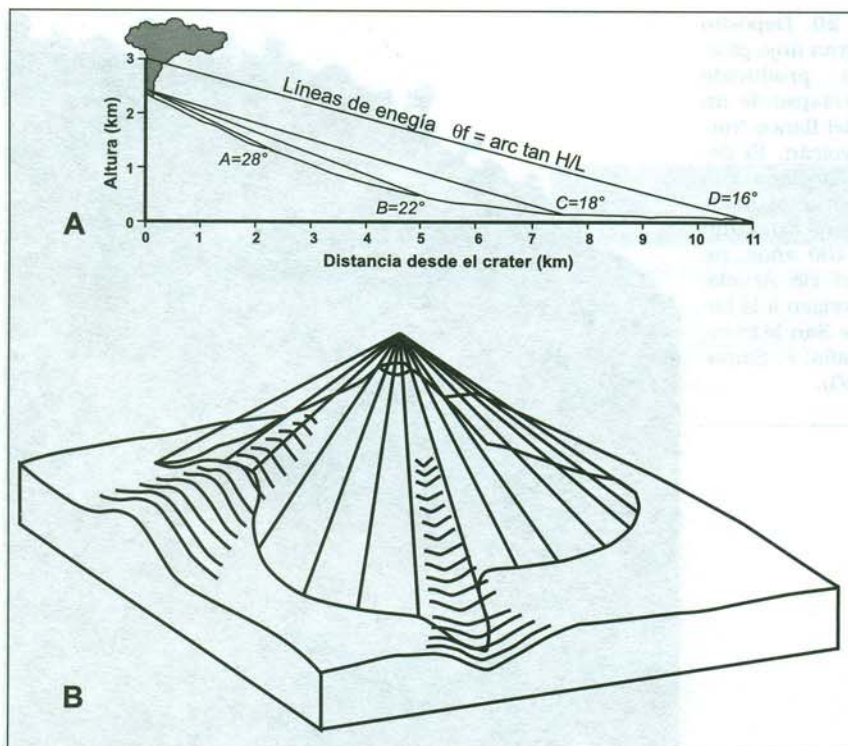


Figura 21. Diagrama que ilustra los conceptos de (A) "línea de energía" y (B) "cono de energía". Se trata de una relación entre el alcance horizontal (L) y la diferencia de alturas (H) entre el sitio de generación y de deposición del flujo. Un flujo piroclástico se detendrá en el sitio de intersección entre el cono de energía y la topografía (Modificado de Thouret, 1994).

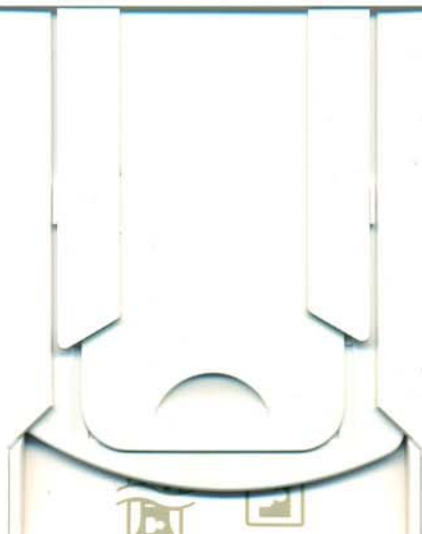
asociado a este fenómeno es bajo. Sin embargo, las obras de captación del proyecto "Tabacundo" (trasvase Laguna San Marcos-río La Chimba), están ubicadas en el flanco Norte del volcán y por lo tanto se encuentran en la zona de mayor peligro dado que las dos últimas erupciones del volcán (hace 360-400 años antes del presente) afectaron esta zona. Se debe también considerar la posibilidad de que se forme un domo cerca a la cumbre máxima, en cuyo caso, las zonas potencialmente afectadas por flujos piroclásticos podrían extenderse a la parte Occidental (en particular el río Blanco),

en cuyo caso la ciudad de Cayambe podría verse seriamente afectada. Esta posibilidad existe, sin embargo se debe enfatizar que esta situación no ha ocurrido en los últimos miles de años, por lo que la probabilidad de que este fenómeno ocurra en el futuro es baja.

Los flujos piroclásticos son extremadamente peligrosos debido a su gran movilidad, que les permite viajar distancias que se miden hasta en decenas de kilómetros, a sus altas velocidades (desde 50 hasta más de 250 km/h) y a las altas temperaturas (desde 200° hasta más de 600°C) en el momento de su emplazamiento. La gente afectada por estos flujos tiene muy pocas posibilidades de sobrevivir. En las partes aledañas de un flujo de este tipo, la gente puede sufrir serias quemaduras, e inclusive morir por la inhalación de ceniza y/o gases calientes. Los objetos y estructuras que se hallen en su camino pueden ser destruidos o arrastrados por el impacto de escombros calientes y/o vientos huracanados asociados. La madera y otros materiales combustibles comúnmente se queman cuando entran en contacto con los bloques, bombas, ceniza y/o gases calientes que conforman los flujos piroclásticos. Debido a su capacidad devastadora, los flujos piroclásticos son considerados como el fenómeno volcánico más letal. Por estas razones y por la imposibilidad de determinar exactamente el momento de su generación, su extensión y su tamaño, su manejo en términos de evacuación poblacional es extremadamente difícil, pero necesariamente debe considerarse la salida temporal, con horas o días de anticipación, de las personas y animales que se encuentren en las zonas potencialmente afectadas, como una medida precautelatoria ante la peligrosidad del fenómeno pero también ante las grandes incertidumbres científicas existentes para su predicción.

■ FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS (LAHARES)

Los flujos de escombros constituyen el fenómeno volcánico más peligroso para las personas que viven en las proximidades de los ríos que descienden de un volcán. Los lahares se forman cuando masas de materiales volcánicos no conso-



lidadados, tales como ceniza depositada en los flancos de las montañas, depósitos glaciares, escombros de flujos piroclásticos y de avalanchas de roca, se mezclan con el agua y comienzan a movilizarse. En el caso de los volcanes ecuatorianos, el agua puede provenir de la fusión del casquete glaciar, de la ruptura de un lago ubicado en un cráter o de fuertes lluvias que acompañen o que sigan a una erupción. Estos flujos se mueven ladera abajo por la fuerza de la gravedad, a grandes velocidades (hasta varias decenas de km/h), siguiendo los drenajes existentes. El tamaño del material movilizado por estos flujos es muy variable pudiendo ser desde arcilla o arena hasta bloques de varios metros de diámetro. Así por ejemplo, los grandes bloques de 1 a 2 metros de diámetro que se observan en los alrededores de Cayambe fueron depositados por los lahares que formaron la planicie en donde está asentada la ciudad.

En el caso de una erupción del volcán Cayambe, el agua para la formación de los lahares puede provenir de la fusión de la nieve o hielo del casquete glaciar, siendo en este caso un fenómeno que acompaña a la erupción; o también por fuertes lluvias que acompañen o que sean posteriores a la erupción. En este último caso, los flujos de lodo pueden prolongarse por semanas o meses después de que la actividad del volcán haya cesado.

Dado el enorme casquete glaciar que cubre al Cayambe, los lahares han sido fenómenos comunes que han acompañado numerosas erupciones de este volcán. La distribución de dichos lahares estará controlada por la ubicación del sitio por donde se produzca la erupción, sin embargo se estima que los drenajes más afectados por este tipo de fenómeno serían aquellos de los flancos Norte y Oriental, afluentes del río Azuela y del río Huataringo, los cuales se dirigen hacia el Oriente para formar los ríos Salado, Quijos y finalmente Coca. En lo que se refiere a los drenajes de la mitad occidental del complejo, se debe considerar como potencialmente peligrosos a aquellos drenajes que nacen directamente del casquete glaciar, pues una erupción en la cumbre podría generar lahares que se dirigirían hacia estos sectores. En particular, se debe considerar el río Blanco que desciende direc-

tamente de la cumbre del volcán y que atraviesa la ciudad de Cayambe; y en menor medida los ríos Monjas y Guachalá en la parte Sur-Occidental y La Chimba en la parte Nor-Occidental del complejo.

La peligrosidad de estos fenómenos está determinada por el volumen de agua y de los materiales sueltos disponibles, así como por las pendientes y por el encañonamiento de los valles. Las personas alcanzadas por un flujo de escombros tienen muy pocas posibilidades de sobrevivir, por lo cual, durante una crisis volcánica (o cuando se produzcan lluvias fuertes durante o después de una erupción) se recomienda a la población que evite el fondo de los valles y quebradas que bajan del volcán. Debido a su alta velocidad y densidad, los lahares pueden mover y aún arrastrar objetos de gran tamaño y peso, tales como puentes, vehículos, grandes árboles, etc. Las edificaciones y la vegetación que se encuentren a su paso serán destruidas o seriamente afectadas. En el caso del volcán Cayambe, las zonas más próximas al volcán (diferentes tonalidades de rojo del mapa de peligros, figura 13) y en especial el fondo de los valles de esta zona, podrían ser afectados por flujos de lodo y escombros en caso de una erupción del volcán o simplemente en caso de fuertes lluvias posteriores a un evento eruptivo. A más de estas zonas, la llanura al occidente del volcán, donde se encuentra asentada la ciudad de Cayambe, puede también ser afectada por flujos de lodo y escombros que podrían descender desde el volcán por el valle del río Blanco, que desciende directamente desde la cumbre del volcán. El peligro potencial de los flujos de escombros que afecten la ciudad de Cayambe es moderado en caso de una erupción en el flanco Oriental, pero, si la erupción ocurre en la cumbre o en el flanco occidental, el peligro es mayor.

En numerosos sitios de la llanura de Cayambe, se puede encontrar a poca profundidad en el suelo, fragmentos de cerámica pre-incáica. Estos fragmentos se encuentran contenidos en un depósito de un flujo de lodo que cubrió parte de la actual llanura de Cayambe (figura 22). En efecto, Patricia Mothes (IG) encontró en un afloramiento cerca al río Blanco en la ciudad de Cayambe un fragmento de cerámica, el cual

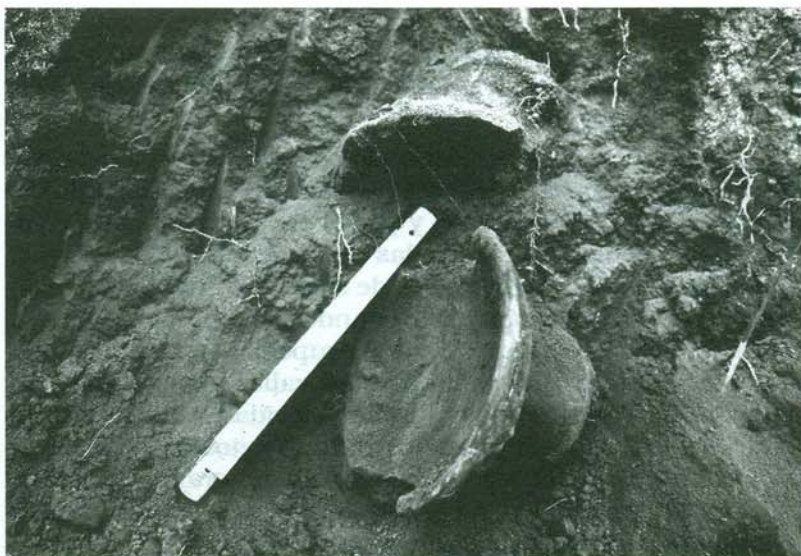
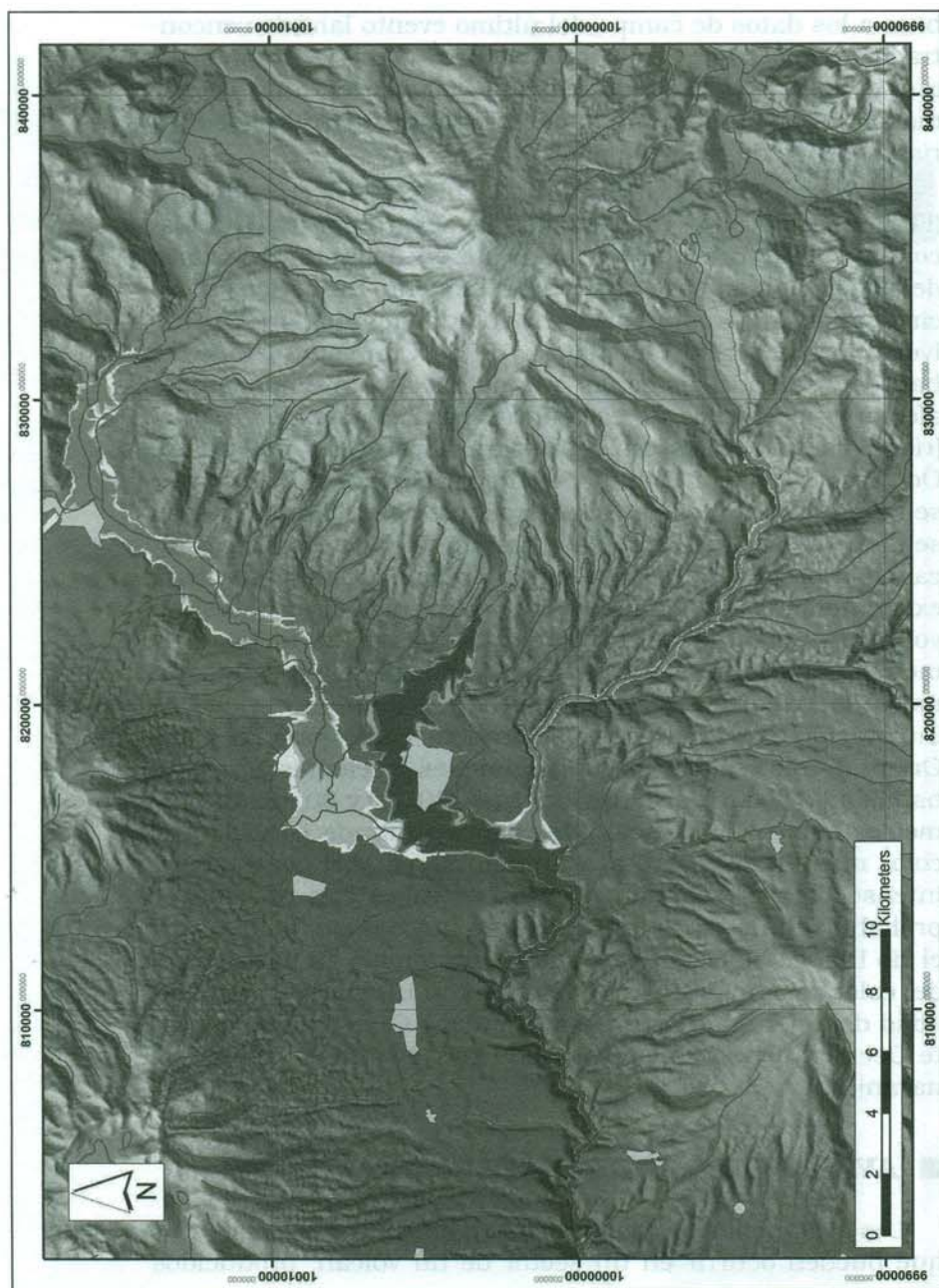


Figura 22. Fragmento de cerámica pre-hispánica encontrado en la planicie de Cayambe en un depósito de un flujo de lodo asociado con una erupción del volcán Cayambe (Fotografía: Jean-Philippe Eissen, IRD).

contenía restos orgánicos (presumiblemente maíz), los cuales fueron datados por Carbono-14 (ver Anexo 5), obteniendo una edad de 260 ± 120 años DC (1690 a BP). Dicha edad es compatible con el final del segundo período de actividad reciente del Cayambe (figura 10).

La delimitación de las zonas potencialmente afectadas por flujos de lodo en la planicie de Cayambe se la ha realizado en

Figura 23. Zonas potencialmente afectadas por flujos de lodo y escombros (lahares) para el volcán Cayambe, realizado con la ayuda del Programa LAHARZ (Schilling et al., 1998). Las áreas afectadas por los lahares se ubican en los fondos de los valles. Las zonas marcadas con color rojo corresponden a las áreas potencialmente afectadas por flujos de lodo en el río Blanco, siendo el color rojo más intenso un evento de menor tamaño (pero mayor probabilidad de ocurrencia). Las zonas potencialmente afectadas por flujos de lodo que transiten por los ríos La Chimba y Guachalá se presentan con varias tonalidades de amarillo. Modelo digital de la topografía (DEM) en base a la información proporcionada por Marc Souris, IRD. Esta figura aparece también en color en las láminas.



base a los datos de campo del último evento lahárico encontrado en esta zona (color gris oscuro, figura 13); mientras que el color gris claro corresponde a un evento de mucho mayor volumen (pero muy poco probable) ocurrido hace varias decenas de miles de años.

Adicionalmente, se ha utilizado una nueva metodología (Figura 23) para definir las zonas de peligro por flujos de escombros. Esta metodología consiste en delimitar las zonas de inundación en base de un procedimiento numérico (es decir usando un programa informático denominado LAHARZ, Iverson *et al.*, 1998 y Schilling, 1998). Con este método, se han determinado las zonas que potencialmente pueden ser afectadas por flujos de escombros para el drenaje Oriental (ríos Salado y Quijos) así como para los drenajes de la parte Occidental (ríos La Chimba, Blanco y Guachalá). En lo que se refiere a los flujos de escombros que se dirijan al Oriente, se ha podido estimar que para que un flujo de escombros alcance la parte baja del río Quijos y afecte la infraestructura existente en esta zona (carretera y oleoductos), se necesitan volúmenes importantes (del orden de más de 20 millones de metros cúbicos). Por otro lado, en lo que se refiere a los drenajes de la parte Occidental, se han definido las zonas de inundación por lahares considerando, como para la parte Oriental, tres escenarios con volúmenes crecientes pero probabilidad de ocurrencia decrecientes (20, 40 y 80 millones de metros cúbicos). La escala de colores utilizada considera el color más intenso para el volumen menor y el color menos intenso para el volumen mayor. Los valles con una mayor probabilidad de tener flujos de lodo (río Salado al Oriente y el río Blanco al Occidente), se han designado en variaciones del color rojo; mientras que los ríos con una menor probabilidad de tener lahares (ríos La Chimba y Guachalá de la parte Occidental), se han presentado con diferentes colores de naranja.

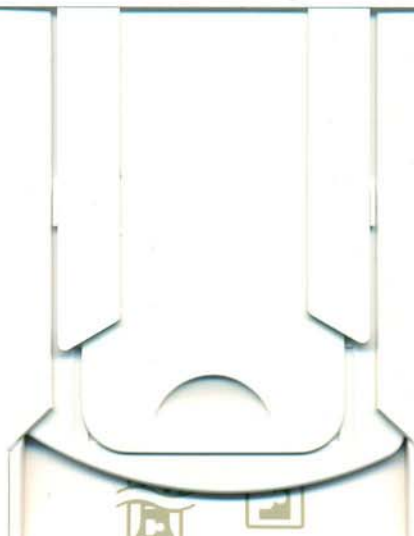
■ AVALANCHAS DE ESCOMBROS

Las avalanchas de escombros son grandes deslizamientos que pueden ocurrir en un sector de un volcán, producidos

por la inestabilidad de los flancos del mismo. Este tipo de fenómenos puede deberse al ascenso de gran cantidad de magma en el edificio volcánico, a un sismo de gran magnitud en las cercanías del volcán, o al debilitamiento de la estructura del volcán inducida, por ejemplo, por la alteración hidrotermal. Este tipo de inestabilidad se ve favorecida cuando el cono volcánico alcanza una altura de 3000 m o más sobre su base. El colapso del edificio, puede estar acompañado y/o seguido por actividad magmática, dado que este gran deslizamiento puede destapar súbitamente el conducto volcánico y generar explosiones de extrema violencia (que lo vulcanólogos llaman "blast"), que generalmente están dirigidas en la misma dirección del colapso y que producen flujos piroclásticos de gran magnitud y alto poder destructivo.

El resultado de una avalancha de escombros es la formación de una depresión, comunmente en forma de herradura y de tamaño variable (caldera de avalancha como la de los volcanes Guagua Pichincha, Pasochoa, El Altar o El Reventador). Los depósitos de las avalanchas de escombros son muy móviles, cubren áreas de considerable extensión (10-1000 km²) con un manto de escombros y arrasan con todo lo que se encuentre a su paso. La mayoría de estratovolcanes han sufrido, al menos una vez durante su historia geológica, un evento de este tipo. Sin embargo, se debe recalcar que son eventos muy infrecuentes en el tiempo; aproximadamente un evento cada varios miles de años o más.

Dado que el volcán Cayambe presenta fuertes pendientes en todos sus flancos, y el gran desnivel existente entre la cumbre y las zonas circundantes (especialmente con respecto a la planicie de Cayambe, 3000 m de desnivel), la ocurrencia de un colapso sectorial es una posibilidad, que aunque remota, debe ser tomada en cuenta. En efecto, fenómenos de este tipo han ocurrido al menos dos veces durante la historia geológica del Cayambe, afectando los flancos Norte y Occidental del mismo. De especial importancia es el evento que desestabilizó la parte Occidental del edificio volcánico y cuyos depósitos se extendieron en la planicie de Cayambe y que estan actualmente expuestos en la confluencia de los ríos Granobles y Guachalá, en la parte SW de la planicie de Ca-

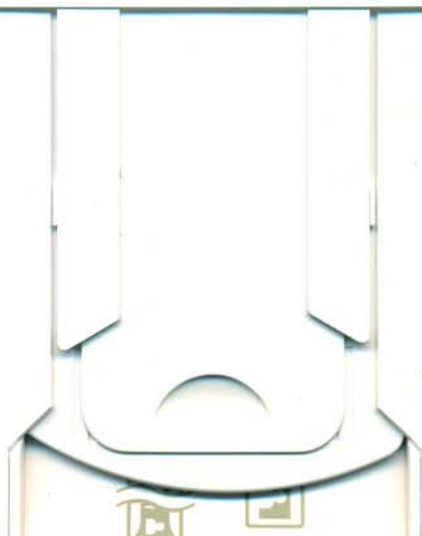


yambe. En el Mapa de peligros volcánicos del Cayambe (Figura 12), se ha considerado dos hipotéticas avalanchas de escombros que afecten una el flanco Norte y la otra el flanco Occidental del volcán. Para delimitar el área potencialmente afectada por estos fenómenos, se consideró una relación H/L (desnivel/alcance del evento) del orden de 0.11 típica de este tipo de eventos.

Dada la magnitud y violencia de las avalanchas de escombros, todo lo que se encuentre en su camino va a ser destruido y, por lo tanto, las personas no tienen posibilidades de sobrevivir. Por esta razón, se recomienda la evacuación de las zonas potencialmente afectadas, si la información científica señala la posibilidad de ocurrencia de un evento de estas características en el futuro cercano.

■ GASES VOLCÁNICOS

Antes, durante y después de una erupción volcánica, es común detectar un notable aumento en la cantidad y tipo de gases emitidos por el volcán. Tales gases consisten principalmente de vapor de agua; sin embargo, casi siempre existen también cantidades variables de otros gases peligrosos para las personas y los animales como SO_2 (dióxido de azufre), CO_2 (dióxido de carbono), o el CO (monóxido de carbono). En las zonas donde soplan continuamente vientos fuertes, estos gases se dispersan rápidamente; no obstante en depresiones y partes bajas, estos gases se pueden acumular y alcanzar concentraciones letales. Durante y después de la erupción del 3 de noviembre de 2002 del volcán El Reventador, se produjeron importantes emisiones de gases volcánicos, los cuales fueron transportados por el viento varias decenas de kilómetros hasta el Valle Interandino, donde fueron fácilmente percibidos por la población. Este fenómeno no representa un mayor peligro para la vida vegetal o animal. Por otro lado, existen gases tóxicos como el flúor y el azufre que se adhieren a la ceniza y producen la contaminación del suelo y las aguas. Adicionalmente, los gases de una columna eruptiva pueden mezclarse con el agua atmosférica provocando lluvias ácidas que podrían afectar a las plantas y animales, así



como los techos de zinc y otros materiales metálicos (que pueden sufrir una fuerte corrosión).

En el caso del volcán Cayambe, los montañistas han reportado en diversas ocasiones un olor a gases sulfurosos en el camino de ascenso a la cumbre del volcán (flanco Sur-Occidental). Sin embargo desde el año 2 000, estos reportes señalan claramente un aumento en el nivel de estas emisiones, las cuales, por la presencia del casquete glaciar, no pueden ser fácilmente identificables en forma de fumarolas porque los gases son emitidos por las grietas del glaciar (Anexo 4). Se debe recalcar que hasta la fecha (Mayo 2004), estas emisiones de gases no representan un peligro para los montañistas.

■ SISMOS VOLCÁNICOS

En las semanas, meses o inclusive años que preceden a una erupción y durante su desarrollo, se pueden detectar muchos microsismos en las cercanías o en el cono mismo del volcán. Este fenómeno, lejos de afectar a los pobladores que habitan en las cercanías del mismo, resulta beneficioso para la comunidad pues permite a los científicos comprender mejor los procesos magmáticos que ocurren al interior del volcán y adelantarse a su ocurrencia. En general, la reactivación de un volcán no produce sismos de mayor magnitud, capaces de afectar las edificaciones en los alrededores del volcán.

Desde el año 2000, los equipos del IG han detectado un incremento en el número de eventos sísmicos provenientes del volcán (Figura 24). La gran mayoría de estos sismos son demasiado pequeños como para ser sentidos por la población, sin embargo en dos ocasiones se han producido eventos con una magnitud mayor a 4 en la escala de Richter, los cuales si fueron sentidos en el sector Refugio y en las comunidades de la parte alta del flanco Sur-Occidental del Cayambe. Se estima que es muy poco probable que ocurran eventos de magnitud suficientemente mayor a estos, como para que provoquen daños a las edificaciones.

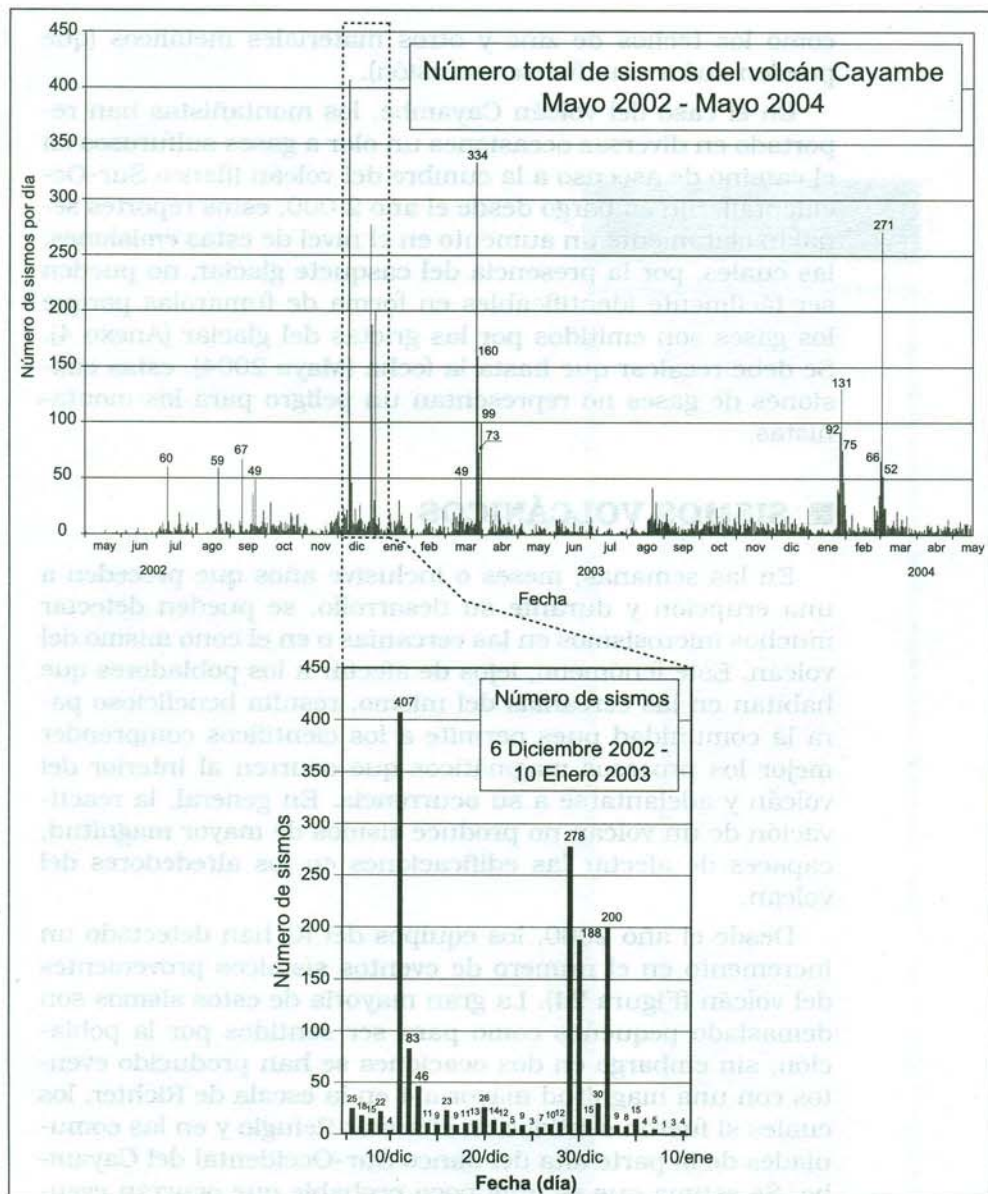


Figura 24. Número de sismos por día registrados en el volcán Cayambe desde Mayo de 2002 hasta la fecha (Fuente: IG, Mayo 2004).

4. Monitoreo volcánico

Los cambios físicos y químicos del sistema magmático bajo el volcán reflejan condiciones de intranquilidad en el sistema volcánico. Algunos de estos cambios pueden ser percibidos directamente por la población que vive en los alrededores del volcán, mientras que otros son únicamente detectados con el uso de instrumentos científicos extremadamente sensibles. La vigilancia o monitoreo volcánico puede hacérsela ya sea por observación visual o instrumentalmente.

■ VIGILANCIA POR OBSERVACIÓN

La vigilancia volcánica por observación consiste en poner en evidencia cambios en la actividad de un volcán, los cuales pueden ser detectables únicamente por los sentidos humanos y por lo tanto pueden ser percibidos directamente por la población. Este tipo de monitoreo consiste en realizar observaciones de manera sistemática para determinar la formación de fracturas, deslizamientos o hinchamiento de la cima del volcán, del cráter activo o de uno de sus flancos. Por otro lado, consiste en detectar cambios en las emisiones fumarólicas, tales como la altura de la columna de gases, su color, su olor, intensidad, etc., o variaciones en el caudal, color, olor de las fuentes termales. Además, puede detectar daños o muerte de la vegetación; la percepción de cambios en el comportamiento de los animales, entre otros. Este método incluye además la percepción de ruidos subterráneos y sísmos de origen volcánico.

Para la realización de estas observaciones, los vulcanólogos pueden servirse de equipo audiovisual con el cual pueden tomar fotografías y/o videos que permitan realizar una

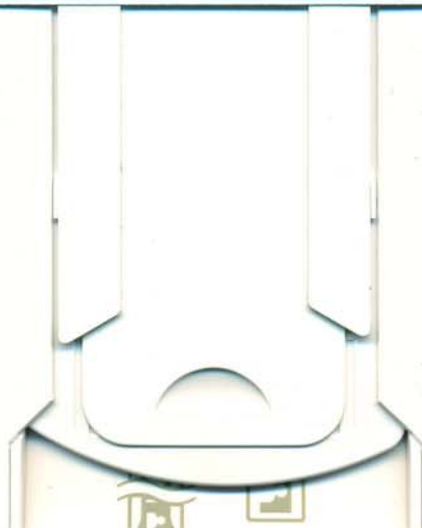
observación más detallada, y así constituir un archivo de imágenes que sirva para la identificación de los cambios en el volcán con el transcurso del tiempo. Recientemente, se está utilizando cámaras térmicas que sirven para determinar anomalías térmicas asociadas con la actividad fumarólica, emisiones de lava, etc. Finalmente, la vigilancia por observación puede ser reforzada con el uso de *imágenes satelitales* que hacen posible el monitoreo de parámetros cuantificables, así como un seguimiento de las nubes de ceniza producidas por las emisiones volcánicas.

En el caso de nuestros volcanes, muchos de los cuales son visitados regularmente por montañistas, las observaciones científicas pueden ser complementadas con las observaciones hechas por los andinistas, los cuales generalmente tienen un buen conocimiento del terreno. En la eventualidad de que ocurran cambios notables, los andinistas pueden tomar nota de los mismos y reportarlos al Instituto Geofísico utilizando el formulario del Anexo 4.

■ VIGILANCIA INSTRUMENTAL

Consiste en utilizar instrumentos científicos muy sensibles, capaces de detectar cambios en el comportamiento físico-químico del sistema magmático del volcán, cambios que generalmente son imperceptibles para las personas. El monitoreo científico moderno de un volcán utiliza métodos diferentes y complementarios. Los más comunes son la detección de la actividad sísmica, la medición de la *deformación* del suelo, el estudio de los cambios químicos de las emisiones de gases en las *fumarolas* y de las fuentes termales y la observación sistemática de la actividad volcánica.

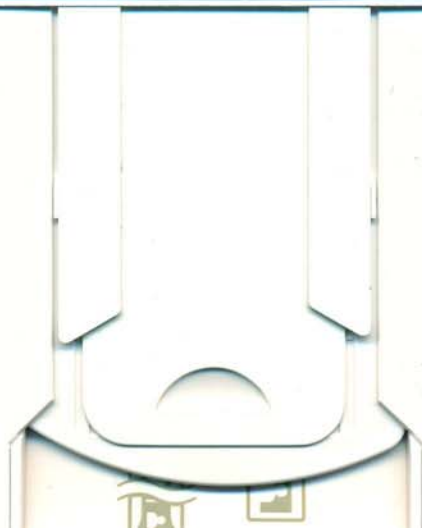
El monitoreo **sísmico** consiste en detectar, por medio de *sismómetros* extremadamente sensibles, las vibraciones del suelo (*sismos*) producidas por la fracturación de las rocas o por el movimiento de magma o de gases magmáticos al interior de un volcán. El ascenso de magma o de otros fluidos magmáticos genera sismos y otras señales sísmicas detectables por los instrumentos y pueden constituir predecesores



de la actividad eruptiva. Durante el proceso de reactivación de un volcán, se observa un aumento del número de eventos sísmicos, que puede pasar de pocos eventos por día a varios cientos o miles de sismos diarios. Pero no solamente se produce un aumento en el número de sismos, generalmente, el tamaño de los sismos (es decir su magnitud) aumenta también hasta a veces ser perceptibles por la población. Aparecen también nuevos tipos de eventos sísmicos, debidos a procesos físicos diferentes. En efecto, el fracturamiento de las rocas bajo un volcán, o el movimiento de fluidos magmáticos al interior de fracturas o grietas son procesos físicamente diferentes que producen eventos sísmicos diferentes.

Entre los principales tipos de señales sísmicas encontradas en volcanes activos se tiene los eventos denominados *volcano-tectónicos* (VT), los eventos de *largo período* (LP), los sismos *híbridos* y el *tremor volcánico*. Los sismos *volcano-tectónicos* son el resultado de la formación o propagación de fracturas o fallas en las rocas que constituyen el volcán. El fracturamiento de las rocas produce una liberación de energía, la cual se transforma en calor y en ondas sísmicas. En el caso de los procesos volcánicos, el fenómeno disparador de este tipo de sismos puede ser la presión que ejercen los fluidos volcánicos (gases, vapor de agua, magma, etc.) sobre las rocas al interior del volcán.

Por el contrario, los sismos de *largo período* se relacionan con el movimiento de fluidos y/o la vibración de grietas o fracturas llenas de fluidos magmáticos (gases o magma) dentro del volcán, mientras que los sismos *híbridos* son el resultado de procesos de fracturamiento de la roca y de movimiento de fluidos al interior de la fracturas recientemente formadas. Se debe señalar que esta clasificación es únicamente referencial, pues los procesos volcánicos son mucho más complejos, razón por la cual pueden existir eventos con características intermedias entre los anteriormente descritos. Finalmente, el *tremor volcánico* es una señal sísmica muy común en los volcanes activos, como por ejemplo el Cotopaxi, el Tungurahua o el Guagua Pichincha. Esta señal es una vibración de larga duración (del orden de minutos hasta días) que puede estar asociada al movimiento o a la sali-



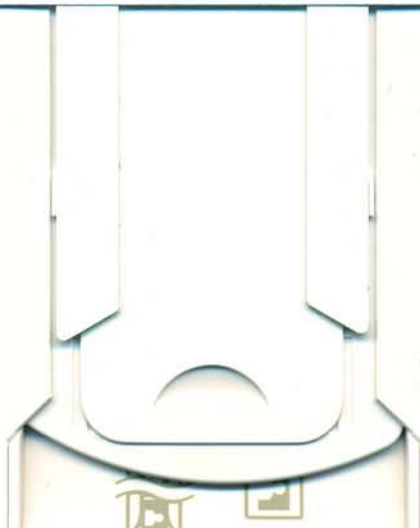
da de gases a altas presiones. Este tipo de señal no se ha hecho presente en el Cayambe hasta la fecha.

El monitoreo de la **deformación del suelo** consiste en detectar cambios en la topografía del volcán (inflación o deflación) relacionados con el ascenso de un volumen de magma introducido en el edificio volcánico. Existen varios métodos para medir la *deformación* de un volcán: la medida de la distancia horizontal entre una base fija y un punto reflector ubicado en los flancos del volcán, para lo cual se utiliza un *distanciómetro electrónico (EDM)*; la medida de los cambios en la pendiente del cono volcánico, utilizando *inclinómetros electrónicos (tiltmeters)*; o, la medida del desplazamiento del suelo en base a *GPS (Global Positioning System)*.

El monitoreo **geoquímico** consiste en determinar cambios en la composición química de las *fumarolas* y de las fuentes termales, variaciones que pueden estar directamente relacionados con el movimiento o el ascenso de magma bajo un volcán. Adicionalmente, y debido a la dificultad y peligrosidad de realizar muestreos periódicos de las *fumarolas* de los volcanes activos, se utiliza el *COSPEC (Espectrómetro de correlación)*, que permite determinar desde una distancia prudencial la concentración del gas de origen magmático SO_2 en la columna de emisión.

■ EL MONITOREO VOLCÁNICO REALIZADO POR EL IG

El monitoreo sísmico del volcán Cayambe se inició en el año 1987, con la instalación de una estación cerca de la población de Pesillo. Este mismo año con el fin de tener un mejor control de los eventos sísmicos producidos por el volcán, se cambió la ubicación de dicha estación hacia el flanco Nor-Occidental, a una menor distancia de la cumbre y de la zona en donde ocurrió la última erupción del volcán, en el flanco Norte. Esta estación (llamada CAYA; figura 25) se mantiene en funcionamiento hasta la actualidad. Por otro lado, entre noviembre de 1997 y marzo de 1998 con el apoyo del IRD se instaló una red temporal compuesta de 5 estaciones sísmicas.



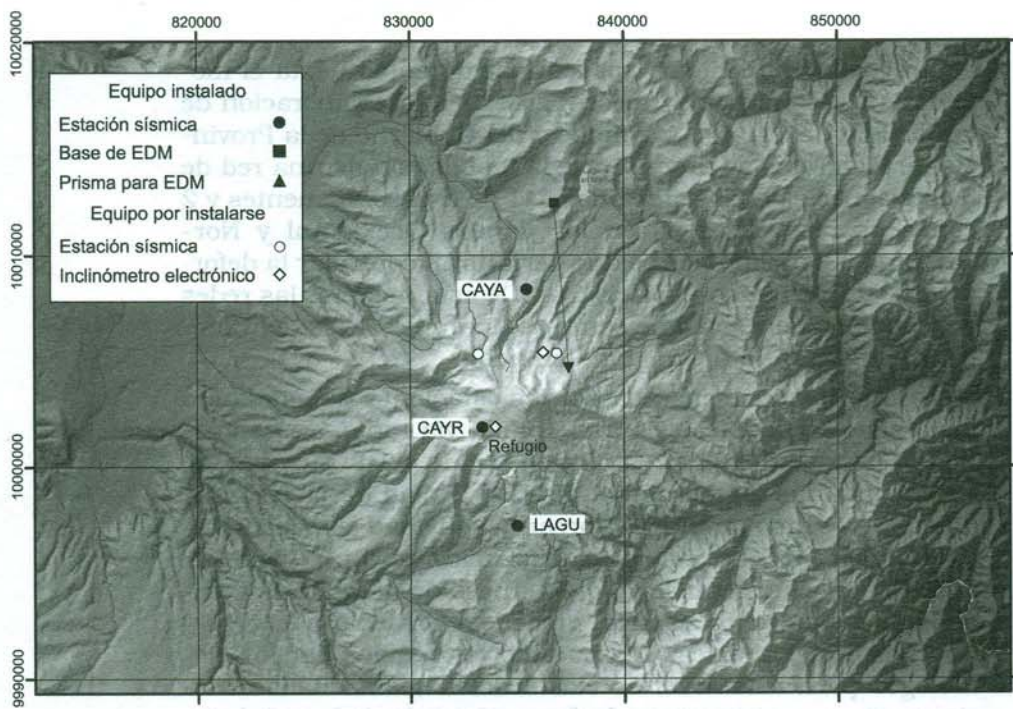


Figura 25. Redes de monitoreo del volcán Cayambe. (Fuente: IG, mayo 2004). Se mencionan las estaciones existentes y las que se planea instalar en el futuro cercano gracias al apoyo del Ilustre Municipio de Cayambe y del Gobierno Provincial de Pichincha.

micas, con el fin de estudiar de manera un poco más detallada la actividad sísmica del volcán (Guiller *et al.*, 1999). En el año 2001, debido a una actividad sísmica anómala en el Cayambe, el IG procedió a instalar una *estación de tres componentes* en las cercanías del refugio (CAYR), en el flanco Sur-Occidental y durante los primeros meses de 2003 se colocó una nueva estación en el flanco Sur (LAGU), para controlar la sismicidad generada durante el mes de diciembre del 2002. Así, la red actual de monitoreo del volcán cuenta con tres estaciones sísmicas y adicionalmente una línea de control de la deformación del flanco Norte, instalada en el año 1998 (figura 25). Además, desde el año 2002 se hacen medidas periódicas de las posibles emisiones de gases de origen magmático (por ejemplo el SO_2) con el COSPEC, sin en-

contrar valores medibles por los instrumentos hasta el momento. En los próximos meses, gracias a la colaboración de la Alcaldía del Cantón Cayambe y del Gobierno de la Provincia de Pichincha se procederá a la instalación de una red de 3 estaciones sísmicas adicionales (1 de tres componentes y 2 con sensores verticales) en los flancos Occidental y Nor-Oriental; y 2 inclinómetros que permitirán controlar la deformación de los flancos Norte y Sur. De esta manera, las redes de vigilancia del Cayambe serán comparables a las del Coto-paxi, Tungurahua o Guagua Pichincha.

La información generada por las estaciones de monitoreo instaladas en el volcán es transmitida vía radio, en tiempo-real, a la base del IG en Quito, en donde existe siempre un especialista las 24 horas del día, los 7 días de la semana, quien tiene como tarea monitorear la actividad sísmica y volcánica del país. La información sísmica recibida debe ser analizada por un sismólogo, quien luego de un análisis detallado de cada evento sísmico, procede a clasificar e interpretar cada señal sísmica. Los parámetros usados por los sismólogos para establecer la clasificación mencionada anteriormente son, entre otros, la forma de onda de la señal sísmica registrada en el *sismograma*, que es como la "firma" del evento y, su contenido de *frecuencias*. En la figura 26A se presenta un sismograma de un sismo tipo VT, registrado en la estación CAYR, en donde se puede observar que el evento sísmico se inicia de forma rápida o impulsiva, alcanzando rápidamente las mayores *amplitudes*, las cuales disminuyen lentamente, de forma casi exponencial. Se observa además que este evento sísmico posee un variado contenido de *frecuencias* (u oscilaciones por segundo). En la figura 27A se observa el sismograma correspondiente a un sismo tipo LP, registrado también en la estación CAYR. Este evento tiene una firma diferente, en el sentido que se inicia de forma progresiva o emergente hasta alcanzar las mayores *amplitudes*, las cuales luego disminuyen suavemente. Se observa además que el contenido de frecuencias es muy limitado. Para observar de mejor manera las diferencias en el contenido de frecuencias de los eventos sísmicos, los sismólogos realizan una representación denominada *espectro de frecuencias* (fi-

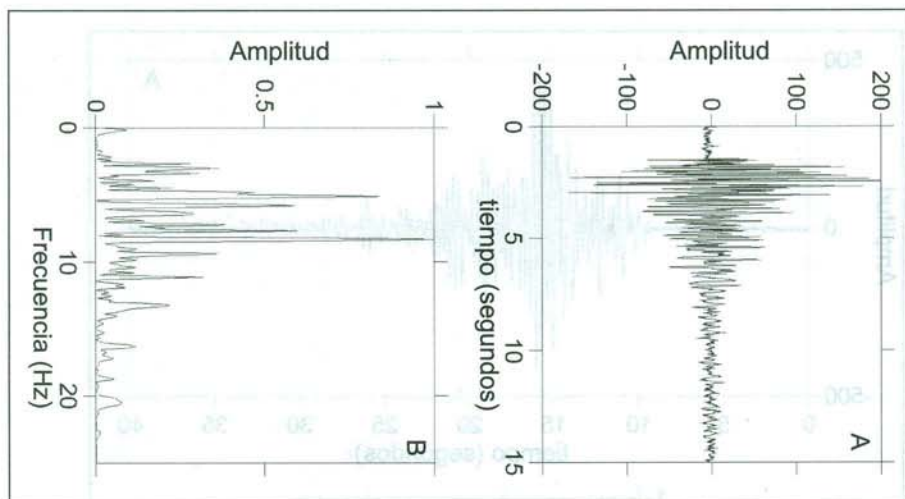


Figura 26. A. Evento sísmico tipo VT, registrado en la estación CAYR el 12 Enero 2004 a las 13H38 GMT. B. Espectro de frecuencias correspondiente al sismo anterior (Fuente: IG).

guras 26B y 27B) en donde los picos de mayor amplitud representan las frecuencias dominantes del sismo. En estas figuras se observa claramente que el evento VT (figura 26B) presenta un espectro amplio (varias frecuencias comprendidas entre 3 y 20 Hz), observándose además una serie de picos que representan las frecuencias dominantes. Por el contrario, el espectro correspondiente al evento LP (figura 27B), se caracteriza por tener una banda de frecuencias más limitada (las frecuencias son menores a 5 Hz), y un solo pico de frecuencia dominante.

■ LA ACTIVIDAD ACTUAL DEL CAYAMBE

El funcionamiento desde 1987 de la estación CAYA permitió la definición de un nivel sísmico de base de la actividad del volcán. Por otro lado, los resultados de la red temporal operada por Guillier *et al.* (1999) permitió conocer que el Cayambe genera una importante actividad sísmica caracterizada por eventos de tipo VT y LP. Desde el año 2000, los equi-

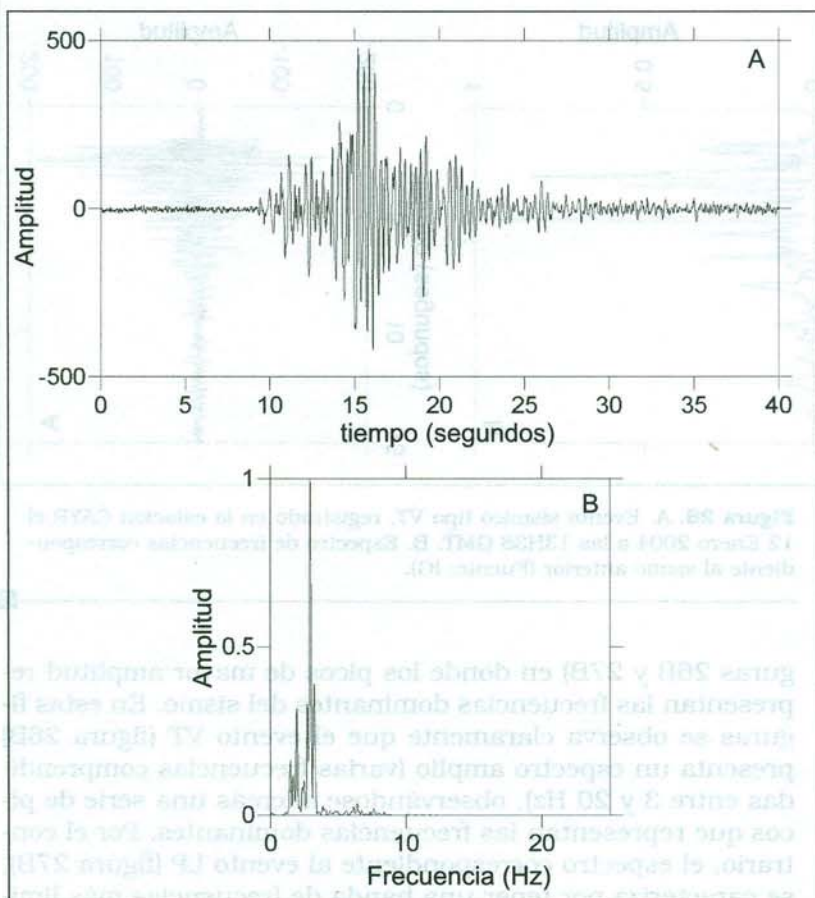
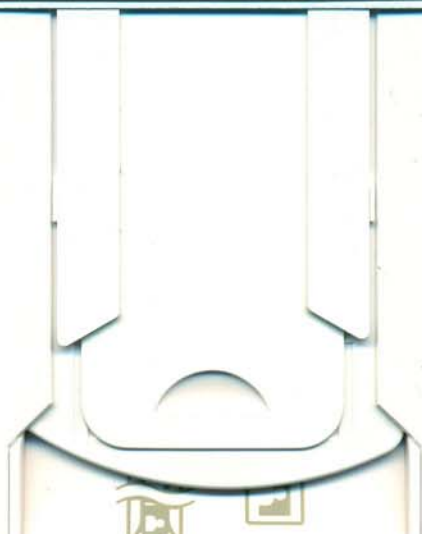


Figura 27. A. Evento sísmico tipo LP, registrado en la estación CAYR el 8 Enero 2004 a las 19H05 GMT. B. Espectro de frecuencias correspondiente al sismo anterior (Fuente: IG).

pos del IG detectaron un incremento en el número de eventos sísmicos provenientes del volcán (figura 24). Estos sismos fueron principalmente de tipo *volcano-tectónico* (VT) y ocurrieron en grupos de decenas hasta cientos de eventos durante varias horas. A estas agrupaciones de sismos que ocurren en un período relativamente corto de tiempo se los

denomina "enjambres sísmicos". Con el paso del tiempo, la ocurrencia de estos enjambres sísmicos ha sido cada vez más frecuente. El nivel de base de la actividad sísmica del Cayambe fue establecido en base a la identificación de tres tipos de eventos sísmicos: los sismos tipo VT, los eventos tipo LP y los eventos Híbridos. Hasta antes de Diciembre del año 2002, este nivel fue de alrededor de 3 sismos por día. A partir de esta fecha, luego de un sismo *tectónico* asociado al sistema de fallas Chingual (sistema de fallas tectónicas ubicadas a pocos kilómetros al Nor-Oriente del volcán y que no están relacionadas directamente con el mismo), estos enjambres fueron de mayor duración y con sismos de mayor magnitud. Esto se puede observar en la figura 24, donde se muestra el número de sismos por día, desde mayo de 2002 hasta la presente fecha (mayo 2004). Luego de ésta crisis sísmica, el nivel de sismicidad aumentó, registrándose desde el mes de Agosto de 2003 un promedio de 9 eventos sísmicos por día. Así, una vez más, el monitoreo sísmico del volcán durante varios años hizo posible identificar la anomalía sísmica de Diciembre de 2002, y dar una "voz de alerta" a las autoridades y a la comunidad, en el sentido que el Cayambe es también un volcán activo. Hasta la fecha (mayo 2004), el nivel de sismicidad se mantiene bajo, aunque se han repetido nuevamente algunos enjambres sísmicos.

denomina "erupciones silenciosas". Con el paso del tiempo, la ocurrencia de estos erupciones silenciosas ha sido cada vez más frecuente. El nivel de base de la actividad silenciosa del Cayambe fue establecido en base a la identificación de tres tipos de eventos sísmicos: los sismos tipo VT, los eventos tipo LP y los eventos híbridos. Hasta antes de Diciembre del año 2002, este nivel fue de alrededor de 3 sismos por día. A partir de esta fecha, luego de un sismo tectónico asociado al sistema de fallas Chigual (sistema de fallas tectónicas que caídas a pocos kilómetros al Nor-Oeste del volcán y que no están relacionadas directamente con el mismo), estos erupciones fueron de mayor duración y con sismos de mayor magnitud. Esto se puede observar en la figura 24, donde se muestra el número de sismos por día, desde mayo de 2002 hasta la presente fecha (mayo 2004). Luego de esta etapa silenciosa, el nivel de actividad aumentó, registrándose desde el mes de Agosto de 2003 un promedio de 9 eventos sísmicos por día. Así, una vez más, el monitoreo silencioso del volcán durante varios años hizo posible identificar la anomalía silenciosa de Diciembre de 2002 y dar una "voz de alerta" a las autoridades y la población del sector que el Cayambe se encontraba en una etapa silenciosa (mayo 2004). El



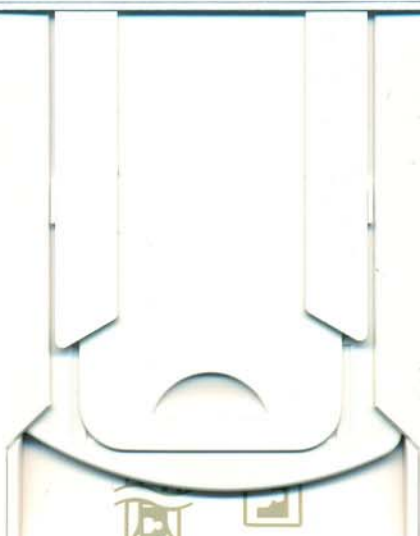
5. Posibles escenarios eruptivos en caso de una reactivación del volcán Cayambe

Desde Diciembre de 2002, el volcán Cayambe ha mostrado un claro incremento en su actividad sísmica (figura 24), así como un incremento en el olor a gases sulfurosos reportados por los montañistas. Estos hechos son signos claros de que están ocurriendo movimientos de fluidos al interior del volcán. Sin embargo, se debe dejar en claro que hasta la fecha (mayo 2004) no existe la certeza que el volcán vaya a entrar en un proceso de reactivación. A pesar de las incertidumbres existentes se puede decir que:

- La intensa actividad sísmica registrada en los últimos meses podría no presentarse nuevamente, y volver a los niveles de actividad sísmica de base, similares a los del año 2000.
- Sin embargo, en base a la información geológica se ha podido establecer que el Cayambe ha presentado alrededor de un evento eruptivo cada doscientos años. Dado que la última erupción ocurrió, según reportes históricos en 1785-1786, parece razonable decir que, desde un punto de vista estadístico, es probable una reactivación del volcán en los años venideros. Vale la pena recordar que, los primeros signos de actividad anormal del Guagua Pichincha ocurrieron en los años 1982-1983, y que la erupción se inició en 1999, es decir cerca de 16 años después. Se debe decir también que cada volcán "se comporta" de forma diferente, de manera que el Cayambe podría despertarse más rápidamente o más lentamente que el Guagua Pichincha.
- Durante los últimos miles de años, la actividad del Cayambe se ha caracterizado por la formación de domos o flujos de lava viscosa; y con los fenómenos volcánicos asociados con los mismos, esto es explosiones breves con

emisión de ceniza, la cual no ha tenido una distribución regional importante; flujos piroclásticos por colapso de domo; y, flujos de lodo y escombros por fusión del casquete glaciario y/o por lluvias durante o después la erupción. El crecimiento de un domo es un proceso lento, que puede durar varios meses o años (como fue el caso de la erupción del Guagua Pichincha entre 1999 y 2001), por lo tanto, se debe considerar que el proceso de reactivación y el crecimiento mismo del domo pueden tomar varios meses o inclusive años.

- El Cayambe es un estratovolcán compuesto, coronado por un complejo de domos en la cima. Así, el conducto volcánico utilizado por los magmas durante las erupciones pasadas no ha sido uno solo. Por esta razón, los domos fueron extruidos en diferentes sitios de los flancos Norte y Oriental del volcán. Existe entonces una incertidumbre en el sentido que no se puede conocer con antelación la ubicación exacta del próximo centro de emisión. Esta incertidumbre es crucial, pues un domo que se forme en el flanco Oriental afectaría únicamente los sectores al Oriente del volcán, completamente deshabitados. Por el contrario, un domo que se forme en la cumbre o peor aún en el flanco occidental presentaría un serio peligro para las zonas densamente pobladas de la parte Occidental. Afortunadamente podemos señalar que en los últimos miles de años, esta última situación no ha ocurrido, habiendo sido afectados únicamente los flancos Norte y Oriental.
- Numerosas evidencias arqueológicas muestran claramente que las poblaciones pre-incáicas asentadas en la llanura de Cayambe fueron afectadas directamente por erupciones del Cayambe, pero también por grandes erupciones cuyo origen fue más lejano. Los fenómenos volcánicos que afectaron la llanura de Cayambe y a sus antiguos habitantes fueron las caídas de ceniza y los flujos de lodo. Como en el pasado, estos fenómenos volcánicos representan las principales amenazas volcánicas para las poblaciones actuales del occidente del volcán.



En base a las consideraciones anteriores, se puede concluir que el escenario más probable en el caso de una futura erupción del Cayambe constituye una erupción caracterizada por la formación de un domo o un flujo de lava viscosa en los flancos Norte u Oriental, cuyos flancos inferiores podrían ser devastados por flujos piroclásticos y flujos de escombros (lahares) por la posible fusión del casquete glaciar. Estos flujos se dirigirían al Oriente por el sistema fluvial de los ríos Salado-Quijos y podrían (dependiendo del tamaño de la erupción) alcanzar el sector de la Cascada de San Rafael, en cuyo caso podrían afectar la principal vía de acceso al sector Nor-Oriental del país, así como el Sistema de Oleoductos Trans-Ecuadoriano (SOTE) y el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP). Dado que la dirección dominante de los vientos es de Oriente a Occidente, las zonas densamente pobladas de la parte Occidental podrían ser afectadas por caídas de ceniza y flujos de lodo secundarios asociados con la removilización de la ceniza depositada en los flancos superiores del volcán.

Un caso particular de este escenario, resultaría el crecimiento de un domo en la cumbre o peor aún en el flanco Occidental, en cuyo caso, la afectación a la parte Occidental y particularmente a la ciudad de Cayambe puede ser mucho mayor. Se debe señalar que una erupción de éste tipo no ha ocurrido en el pasado reciente del volcán (es decir durante los últimos 10 000 años).

Finalmente, un segundo escenario, considera una erupción de mucho mayor tamaño, en la cual se produzcan flujos piroclásticos por el colapso de una columna eruptiva (como en la erupción del 3 de Noviembre de 2002 del volcán El Reventador). En este caso, los flujos piroclásticos descenderían por varios flancos del volcán, así como los flujos de escombros; y la distribución de ceniza sería mucho más importante. La experiencia de la erupción del volcán El Reventador y de otros volcanes alrededor del mundo como el Mount Saint Helens (Washington, USA), el Chichón (México) o el Pinatubo (Filipinas) muestra que pueden ocurrir erupciones extremadamente grandes, aunque su probabilidad de ocurrencia haya sido baja.

De la evaluación presentada anteriormente (resultante de un largo trabajo científico) se desprende que la comunidad que vive en los alrededores del volcán necesita definir un plan de acción, en caso que se inicie un proceso eruptivo. El establecimiento de tal plan de acción, que permita disponer de un ambiente de seguridad, es una tarea que debe estar sentada en cuatro pilares fundamentales:

1. Un sistema de vigilancia permanente, que permita a los científicos emitir las alertas tempranas que las autoridades y la población necesitan. Si bien el monitoreo volcánico realizado por el IG, permite detectar los cambios que ocurren en el volcán, se debe recalcar que los fenómenos volcánicos son procesos naturales extremadamente complejos, que la ciencia moderna no entiende completamente. Por esta razón, la comprensión de los procesos naturales involucra grandes incertidumbres, de manera que no es posible predecir con certeza el tamaño ni el momento exacto de la ocurrencia de una erupción;
2. Estas alertas deben estar dirigidas a las autoridades respectivas, las cuales, con toda la seriedad del caso, tomen las decisiones necesarias en el momento adecuado;
3. Un sistema de comunicación, que permita que las decisiones tomadas por las autoridades lleguen a la población de manera oportuna;
4. Una sociedad preparada, conocedora de los peligros a los que está expuesta y de las medidas precautelatorias que debe tomar para afrontar un fenómeno natural. Puesto que la población de los alrededores del volcán no tiene una percepción clara de lo que es una erupción volcánica y peor aún, no considera al Cayambe como un volcán que podría entrar en un proceso de reactivación, es fundamental que se inicie un proceso de capacitación que enseñe a la comunidad los peligros que pueden afectarla, pero también las acciones a tomarse en caso de una erupción.

Si estas cuatro acciones se cumplen a cabalidad, podemos estar seguros que habremos dado un gran paso en la

Referencias

- Arnold J.R. & Libby W.F. (1951). Radiocarbon date, *Science*, 113:111-120.
- Ascásubi J.J. (1802). Letter to Baron Alexander von Humboldt. Alexander von Humboldt. *Biefe aus Amerika, 1799-1804*. Berlin, Herausgegeben von Ulrike Moheit, Akademik Verlag. 174-176.
- Crandell D.R., Booth B., Kusumadinata K., Shimozuru D., Walker G.P.L. & Westercamp D. (1984). *Sourcebook for volcanic-hazard zonation*, UNESCO.
- Gondard P. & López F. (1983). *Inventario arqueológico preliminar de los Andes septentrionales del Ecuador*. Quito, Museo Banco Central del Ecuador, 274 pp.
- Guaña P. (2002). *Cayambe: la cosmovisión y su cultura milenaria*. VI encuentro del Consejo de los Ancianos y Guías espirituales indígenas de las Américas, Chimaltemango, Guatemala, 28 abril-3 mayo 2003.
- Guiller B., Samaniego P., Ruiz M., Chatelain J.-L., Monzier M., Yepes H., Robin C. & Bondoux F. (1999). *Steady long-period activity at Cayambe volcano, Ecuador. Location, spectral analysis and consequences*. Fourth ISAG, Goettingen (Germany), extended abstracts, Editions de l'ORSTOM, Paris.
- Iverson R.M., Schilling S.P. & Vallance J.W. (1998). Objective delineation of lahar-hazard zones downstream from volcanoes. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 972-984.
- Hall M.L. & Mothes P. (1994). Tefroestratigrafía Holocénica de los volcanes principales del Valle Interandino, Ecuador; en *El contexto geológico del espacio físico Ecuatoriano*, ed. R. Marrocco, pp. 47-67, Corporación Editora Nacional & Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Malin M.C. & Sheridan M.F. (1982). *Computed-assisted mapping of pyroclastic surges*, *Science*, 217, 637-640.
- Monzier M., Samaniego P. & Robin C. (1996). Le volcan Cayambe (Équateur): son activité au cours des 5000 dernières années et les menaces qui en résultent. *Bulletin de l'Institut Français des Études Andines* 25 (3), 389-397.

- Mothes P. & Hall M.L. (1998). Quilotoa's 800 y BP ash: a valuable stratigraphic marker unit for the integration period; en *Actividad volcánica y pueblos precolombinos en el Ecuador*. P. Mothes (ed.), Quito, Ecuador, ABYA-YALA, 111-138.
- Nairn I.A. (1991). *Volcanic hazards of Okataina Volcanic Centre*. New Zealand Ministre of Civil Defense, *Volcanic Hazards Information Series No. 2*, 29 p.
- Neall V.E., Houghton B.F., Cronin S.J., Donoghue S.L., Hodgson K.A., Johnson D.M., Lecointre J.A. & Mitchell A.R. (1999). Volcanic hazards at Ruapehu volcano. New Zealand Ministre of Civil Defense, *Volcanic Hazards Information Series No. 8*, 30 p.
- Newhall C.G. & Self S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) : an estimate of explosive magnitude for historical eruptions, *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p. 1231-1238.
- Samaniego P. (1996). *Estudio vulcanológico y petrológico de las fases recientes del volcán Cayambe (Ecuador)*. Tesis de Ingeniero. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 143 p.
- Samaniego P., Monzier M., Robin C. & Hall M.L. (1998). Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology* 59, 451-459.
- Samaniego P. (2001). *Transition entre magmatismes calco-alcalin et adakitique dans le cas d'une subduction impliquant une ride océanique: le volcan Cayambe (Equateur)*, Tesis Doctoral, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France. p. 259.
- Samaniego P., Monzier M., Robin C., Eissen J.P., Hall M.L., Mothes P. & Yepes H. (2002). *Mapa de los peligros potenciales del volcán Cayambe. (Esc. 1/70.000)*. Edit. IGM-IG/EPN-IRD.
- Samaniego P., Eissen J.-P., Le Pennec J.-L., Hall M.L., Monzier M., Mothes P., Ramón P., Robin C. Egred J., Molina I. & Yepes H. (2003). *Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua. Serie Los peligros volcánicos en Ecuador, No. 1*. Edit. Corporación Editora Nacional, IG-EPN, IRD, p. 108.
- Samaniego P., Robin C., Monzier M., Eissen J.Ph., Mothes P. & Hall M.L. (2004). El Complejo Volcánico Cayambe: Síntesis geológica, actividad holocénica y evaluación de los peligros volcánicos. *Investigaciones en Geociencias*, Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Schilling S.P. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated delineation of lahar hazard zones, *U.S. Geological Survey Open-file Report*.

- Simkin T. & Siebert L. (1994). *Volcanoes of the world*, Geosciences Press Inc., Washington DC., 349 pp.
- Tilling R.I. (1993). *Los peligros volcánicos*. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos (WOVO), UNESCO-USAID-USGS. 125 pp.
- Thouret J.C. (1994). *Méthodes de zonage des menaces et des risques volcaniques*. en *Le Volcanisme*, ed. J.L. Bourdier, pp. 267-283, Editions BRGM, Orleans, France.
- USGS Cascades Volcano Observatory Webpage (<http://volcan.wr.usgs.gov>)
- Villalba F. (1998). Aprovechamiento de campos anegables para la agricultura en la época prehispánica - El caso Cayambe; en *Actividad volcánica y pueblos precolombinos en el Ecuador*. P. Mothes (ed.), Quito, Ecuador, Abya-Yala, 191-205.

GLOSARIO

A.C.: Se dice de las fechas obtenidas en base a dataciones radiométricas antes del nacimiento de Cristo.

AFM (Acoustic Flow Monitor): Sensor sísmico capaz de detectar las vibraciones del suelo causadas por el paso de un *flujo de lodo y escombros*.

Amplitud: La amplitud de una señal sísmica corresponde a la magnitud del movimiento del suelo en un instante dado producido por la acción de las *ondas sísmicas*.

Andesita: Roca de origen volcánico de color gris medio, que contiene entre 53 y 63% de *sílice*. El color, la composición química, la *viscosidad* y el carácter eruptivo son intermedios entre un *basalto* y una *dacita*. Es el caso de la mayoría de rocas de los volcanes Tungurahua, Cotopaxi, Sangay, El Reventador.

AP: Antes del presente. Abreviación utilizada para una fecha ocurrida en el pasado geológico.

Arco volcánico: Cadena de volcanes (islas o montañas) ubicada cerca de los límites de las *placas tectónicas*, formados como consecuencia del magmatismo asociado a las zonas de *subducción*.

Átomo: Unidad elemental de la materia. Elemento químico constituido por un núcleo (formado a

su vez por protones y neutrones) alrededor del cual se encuentran los electrones. El número de electrones define las propiedades químicas del átomo y el núcleo sus propiedades físicas.

Avalancha de escombros: Grandes deslizamientos que pueden ocurrir en un volcán, y que desplazan enormes volúmenes de rocas y otros materiales a altas velocidades y a grandes distancias desde el volcán. Estos deslizamientos se producen por la inestabilidad de los flancos del volcán, fenómeno que puede deberse a la intrusión de magma en el edificio volcánico, a un sismo de gran magnitud, o al debilitamiento de la estructura del volcán inducida por ejemplo, por la alteración hidrotermal.

Basalto: Roca de origen volcánico de color gris oscuro, que contiene menos de 53 % de *sílice*. En estado fundido presenta una baja viscosidad, que implica una erupción generalmente no explosiva que produce flujos de lava (e.g. Islas Galápagos).

Balístico (Fragmento): Fragmento de roca expulsado violentamente por una erupción volcánica y que sigue una trayectoria balística, en forma de parábola.

Blast: Explosión volcánica de gran escala producida por la despresurización violenta de un cuerpo de

magma cercano a la superficie. Este fenómeno puede deberse a un deslizamiento de una parte de un edificio volcánico. Un "blast" es una mezcla caliente de baja densidad de fragmentos de roca, ceniza y gases que se mueve a altas velocidades a través de la superficie terrestre.

Bloques y bombas volcánicas: Fragmentos de lava de tamaños superior a 64 mm expulsado por una erupción volcánica. Si son expulsados en estado sólido se denominan bloques, mientras que si son expulsados en estado semi-sólido o plástico se denominan bombas.

Caída de ceniza: Fenómeno por el cual la ceniza (u otros materiales piroclásticos) cae por acción de la gravedad desde una columna eruptiva. La distribución de ceniza es función de la dirección de los vientos.

Caldera: Gran depresión de origen volcánico, generalmente de forma circular o elíptica, de varios kilómetros de diámetro, formada por grandes erupciones volcánicas. La depresión con forma de anfiteatro formada por el deslizamiento de un flanco de un volcán o colapso sectorial se denomina **caldera de avalancha**.

Cámara magmática: Reservorio subterráneo de magma, ubicado a varios kilómetros bajo un volcán.

Carbono-14: Isótopo radiactivo del átomo de carbono, que por estar presente en la materia orgánica y por su tiempo de vida media de 5630 años, permite utilizarlo para

datar la materia orgánica hasta una edad de alrededor de 50 000 años antes del presente. Método de *dataciones radiométricas*, basado en el decaimiento radiactivo del Carbono-14. En vulcanología es utilizado para determinar la edad de las erupciones volcánicas menores a 40 000 años antes del presente (aAP).

Ceniza o Ceniza volcánica: Fragmentos de roca de origen volcánico de tamaño menor a 2 milímetros expulsados en la atmósfera por una explosión volcánica.

Colapso sectorial: Proceso de destrucción de una parte del edificio volcánico. Las *avalanchas de escombros* se producen por el colapso sectorial de un volcán.

Columna eruptiva: El material expulsado por una erupción volcánica puede ascender verticalmente sobre el cráter, formando una nube de erupción o columna eruptiva.

Conducto volcánico: Pasaje o fractura subterráneo por el cual el magma asciende desde una cámara magmática hacia la superficie.

COSPEC: ver Espectrómetro de correlación.

Corteza: Parte más externa y rígida de la Tierra. Generalmente está constituida de rocas de composición basáltica (corteza oceánica) o de rocas más silíceas (corteza continental).

Cuaternario: Período de la historia geológica iniciado hace 2 millones de años. Está constituido por dos épocas: el Pleistoceno (2 millones-

10 000 años antes del presente) y el Holoceno (desde hace 10 000 años hasta el presente).

Cráter: Depresión de forma aproximadamente circular, de menos de 2 kilómetros de diámetro, con paredes muy empinadas, generalmente ubicada en la cima de un volcán, y formada por la explosión o el colapso asociado/a con una erupción volcánica.

Dacita: Roca de origen volcánico de color gris claro y enriquecida en sílice (entre 63 y 68 % SiO_2). En estado fundido presenta generalmente una alta *viscosidad*. Las erupciones de magmas dacíticos son generalmente explosivas (e.g. Guagua Pichincha) y pueden producir enormes volúmenes de tefra, *flujos piroclásticos* y *domos de lava*. La mayoría de las rocas jóvenes del nevado Cayambe tienen composición dacítica.

DC: Se dice de las fechas obtenidas en base a dataciones radiométricas después del nacimiento de Cristo.

Datación radiométrica: Método que permite determinar la edad de una roca en base al decaimiento radiactivo de diferentes elementos (e.g. *Carbono-14*).

Deformación: Uno de los parámetros, que junto con la sismicidad y el control geoquímico permiten monitorear el estado de un volcán. El control de la deformación consiste en realizar medidas periódicas de la posición de puntos fijos y ver sus posibles variaciones en el tiempo. Estas medidas pueden ser realizadas por medio de inclinóme-

tros, EDM (*Electronic Distance Measure*), GPS (*Global Positioning System*), entre otros.

Desplazamiento reducido (DR): Parámetro sísmico utilizado para cuantificar el tamaño de las explosiones volcánicas. Este parámetro es proporcional a la energía liberada por un evento explosivo. El DR se calcula en función de la amplitud del desplazamiento del terreno producida por una onda sísmica y la distancia recorrida por dicha onda.

Distanciómetro electrónico: Instrumento científico de alta precisión que permite medir con una precisión de milímetros distancias horizontales. Se compone de un espejo (prisma) que se coloca en un sitio fijo y desde otro punto, igualmente fijo, se emite un rayo láser hacia el espejo. Se mide el tiempo de viaje del láser y se determina la distancia. La comparación con medidas anteriores permite comparar las variaciones existentes.

Domo: Abultamiento en forma de cúpula formada por la acumulación de lava viscosa, caracterizada por presentar flancos muy pendientes. Generalmente están formados por lavas de composición andesítica, dacítica o riolítica y pueden alcanzar alturas de cientos de metros.

Enjambres sísmicos: Grupos de decenas hasta miles de eventos sísmicos que se observan durante varias horas o decenas de horas.

Escala de Richter: Escala que mide la magnitud o energía liberada por un sismo. Los incrementos de energía son de forma logarítmica,

lo que quiere decir que un sismo de magnitud 8 libera 10 veces más energía que un sismo de magnitud 7. La magnitud de un sismo se estima en base a los registros de los instrumentos sísmicos. El concepto de magnitud de un evento sísmico fue introducida en 1935 por Charles F. Richter con la finalidad de establecer una escala convencional que permita comparar los diferentes sismos de California.

Escoria: Fragmentos de lava formados cuando pequeños volúmenes de lava (generalmente basalto o andesita), aún en estado líquido, es expulsada hacia la atmósfera, se enfrían en el aire y caen en forma de fragmentos oscuros de roca volcánica ricos en cavidades.

Espectro de frecuencias: Contenido de frecuencias de una señal sísmica. Permite determinar las frecuencias dominantes de un evento sísmico.

EDM (Electronic Distance Measure): ver Distanciómetro electrónico

Espectrómetro de correlación: Instrumento científico que permite de determinar la cantidad de dióxido de azufre (SO_2) en la columna de gases emitida desde el cráter. La medición se hace a partir de un sitio lejano al volcán.

Estratovolcán: Edificio volcánico de flancos con fuertes pendientes construido por el apilamiento de flujos de lava y niveles de tefra (e.g. Tungurahua, Cotopaxi, etc).

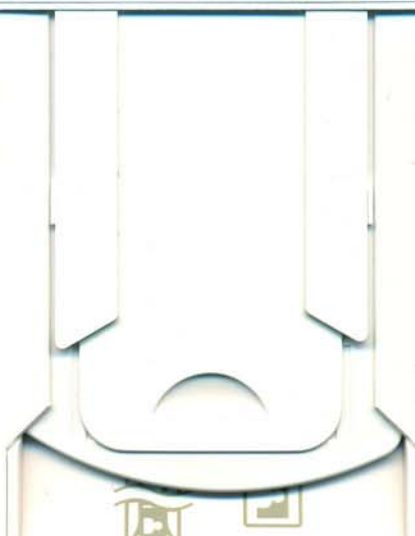
Estromboliana (erupción): Tipo de erupción volcánica caracterizada por un dinamismo eruptivo un po-

co más explosivo que en una erupción *hawaiana*. En este tipo de erupción existe una importante producción de ceniza y escoria, la cual se acumula en los alrededores del cráter para formar un cono (cono de escoria o cono estromboliano). Este término proviene del volcán Stromboli (Italia).

Estación sísmica: Grupo de instrumentos científicos que permite detectar las vibraciones del suelo. Consta de un sensor sísmico (sismómetro) y de un equipo electrónico que transmite en tiempo real la señal sísmica desde el terreno hasta el Observatorio. Existen varios tipos de estaciones sísmicas. Generalmente, estos equipos registran las vibraciones del suelo en un rango de frecuencias comprendida entre 1 Hz y varios cientos de Hz.

Estación de un componente, constituida por un sensor sísmico que detecta únicamente los movimientos verticales del suelo. **Estación de tres componentes,** constituida por un sensor sísmico que permite detectar el movimiento del suelo en las tres dimensiones (vertical y dos horizontales). **Estación de Banda Ancha,** Estación sísmica de tres componentes que puede detectar las vibraciones del suelo dentro de una banda de frecuencias comprendida entre menos de 0.01Hz y varios cientos de Hz.

Flujo de lava: Derrame o corriente de roca fundida, originados en un cráter o en fracturas de los flancos del volcán, por erupciones generalmente no explosivas. Los flujos de lava descienden por los flancos del



volcán restringidos únicamente a las quebradas y pueden viajar ladera abajo hasta por varias decenas de kilómetros, desplazándose generalmente a bajas velocidades, del orden de decenas y raramente de centenares de metros por hora para lavas de tipo andesitas a dacitas.

Flujo piroclástico: Mezcla caliente (300-800°C) de gases, ceniza y fragmentos de roca, que descienden por los flancos del volcán, desplazándose a grandes velocidades (75-150 km/h). Ocurren generalmente en erupciones grandes y explosivas o por el colapso del frente de un domo o un flujo de lava.

Flujos de lodo y escombros (lahares): Mezclas de materiales volcánicos, removilizados por el agua proveniente de la fusión del casquete glaciar, de un lago cratérico o de fuertes lluvias. Estos flujos se mueven ladera abajo, movidos por la fuerza de la gravedad, a grandes velocidades (hasta 85 km/h), siguiendo los drenajes existentes; sin embargo pueden sobrepasar pequeñas barreras topográficas con relativa facilidad.

Freática (erupción): Explosión de vapor, agua y otros materiales, resultado del calentamiento del agua subterránea y de la acumulación de vapor en niveles bajo la superficie. Este tipo de erupción ocurre cuando el agua subterránea entra en contacto con rocas calientes en las cercanías de un cuerpo de magma. En este tipo de erupción el magma no se encuentra involucrado.

Freatomagmática (erupción): Explosión volcánica que envuelve gases magmáticos y vapor, combinados con lava y otros fragmentos de roca. Este tipo de actividad volcánica es el resultado de la interacción entre el agua subterránea, del mar o de un lago y el magma.

Frecuencia: Número de oscilaciones por unidad de tiempo (segundo) de una onda sísmica. Su símbolo es el Hertz (Hz).

Fuente de lava: Emisión explosiva de gases y materiales piroclásticos en estado fundido que ascienden decenas a cientos de metros del cráter. Este tipo de actividad es sostenida por minutos a horas de duración.

Fumarola: Emanación de gases y vapor de agua, generalmente a altas temperaturas, que salen de fracturas o grietas de la superficie de un volcán o de una zona con actividad volcánica. La mayor parte de los gases emitidos son vapor de agua, sin embargo se encuentran otros gases como CO₂, CO, SO₂, H₂S, CH₄, HCl, etc.

GPS (Global Positioning System): Sistema de Posicionamiento Global que permite conocer la ubicación (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar) de un punto sobre la superficie terrestre, en base a las señales emitidas por una serie de satélites artificiales.

Hawaiiana (erupción): Tipo de erupción de magmas basálticos caracterizada por un dinamismo eruptivo poco o nada explosivo. Este tipo de erupción involucra fuentes de lava, cantidades restringidas de

ceniza y escoria y produce generalmente flujos de lava que salen de una fractura o de un cráter. Este término proviene de las islas Hawaii.

Hidrotermal: Relacionado con las fuentes termales o con la acción de dichos fluidos. Se denomina **alteración hidrotermal** a las transformaciones que sufren las rocas o minerales por acción de los fluidos (agua y gases) calientes asociados a un cuerpo de magma.

Holoceno: Época de la historia de la Tierra, que forma parte del período Cuaternario y que se extiende desde hace 10 000 años hasta el presente.

Hertz (símbolo Hz): Unidad de frecuencia. 1 Hz = 1 vibración u oscilación por segundo. 0.01 Hz = 1 vibración u oscilación por 100 segundos. 100 Hz = 100 vibraciones u oscilaciones por segundo.

Inclinómetro electrónico (tiltmeter): Instrumento científico que permite detectar las variaciones en la pendiente del terreno.

Intensidad: Escala cualitativa subjetiva que mide los efectos de un sismo sobre las personas, las edificaciones y la naturaleza. Se utiliza generalmente la escala de Mercalli modificada.

Isótopo: Átomo de un mismo elemento químico pero con un número diferente de neutrones en el núcleo. Tienen las mismas propiedades químicas, pero propiedades físicas diferentes.

Isótopo radiactivo: Isótopo de un átomo que no es estable. Es decir que con el paso del tiempo, y con un *periodo* propio, se transforma en un átomo de otro elemento.

Lahares : ver Flujos de lodo y escombros.

Lapilli: Fragmento de roca de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, emitido durante una erupción volcánica.

Lava: Término utilizado para referirse al magma que alcanza la superficie en estado líquido que ha perdido la mayoría de su contenido en gases. Roca fundida que es emitida de un *cráter* o una fisura eruptiva.

Lluvia ácida: Ciertos gases magmáticos (SO_2 , Cl, entre otros) emitidos por un volcán en erupción, al entrar en contacto con el agua atmosférica forman ácidos fuertemente corrosivos que caen a la superficie en forma de lluvia.

Mapa de peligros: Mapa utilizado para representar las áreas afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos.

Magma: Roca fundida que contiene una fase líquida, gases disueltos, cristales de minerales y eventualmente burbujas de gas. Los magmas se forman a grandes profundidades en el Manto o en la Corteza Terrestre. Cuando el magma ha perdido sus gases y alcanza la superficie se denomina *lava*. Si el magma se enfría al interior de la corteza terrestre forma las rocas intrusivas.

Magnitud: Valor que estima la energía liberada por un sismo. Se utiliza generalmente la *escala de Richter*.

Manto: Zona del interior del planeta ubicada entre la *Corteza* y el *Núcleo*.

Nube de ceniza: Masa de gases y ceniza, generada por una explosión volcánica o derivada de un flujo piroclástico.

Nube ardiente: ver Flujo piroclástico.

Núcleo terrestre: Parte más interna de la Tierra.

Núcleo atómico: Parte central de un átomo, constituido por los protones y los neutrones y que concentra casi toda la masa de un átomo.

Peleana (erupción): Tipo de erupción volcánica caracterizada por el crecimiento de un domo de lava viscosa, el cual puede ser destruido por un colapso gravitacional o por explosiones de corta duración, produciendo flujos piroclásticos o nubes ardientes. Este término proviene del volcán Montagne Pelée, Martinica.

Peligros volcánicos: Fenómenos potencialmente dañinos que pueden ocurrir durante una erupción volcánica. En términos probabilísticos los peligros volcánicos representan la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente peligroso.

Periodo o tiempo de vida medio de un átomo radiactivo: Es el tiempo necesario para que se desintegre la mitad de número inicial de átomos. Es decir que, después de un periodo el número inicial de

átomos (N) será de la mitad ($N/2$), después de 2 periodos será de la cuarta parte ($N/4$), después de 3 periodos, el número de átomos será de la octava parte ($N/8$), y así sucesivamente. Por ejemplo, el periodo o tiempo de vida media del Carbono-14 es de 5630 años, así, después de 15 periodos (84 450 años), casi no subsisten los átomos iniciales. En la práctica, es casi imposible utilizar el Carbono-14 para conocer la edad de la materia orgánica más vieja que 50 000 años.

Piroclastos: Fragmentos de roca volcánica fracturada emitidos durante una erupción volcánica explosiva. Incluye piedra pómez, ceniza y otros fragmentos de roca.

Placas tectónicas: Grandes fragmentos de la corteza terrestre. Estas placas se encuentran "flotando" sobre una capa más dúctil y plástica del Manto terrestre y se desplazan lentamente con una velocidad promedio de varios cm/año.

Pleistoceno: Epoca de la historia de la Tierra, que forma parte del periodo Cuaternario y que se extiende desde hace 2 millones de años hasta el inicio del Holoceno (hace 10 000 años).

Pliniana (erupción): Tipo de erupción volcánica caracterizada por una extrema violencia y explosividad, en la cual grandes cantidades de ceniza y otros materiales piroclásticos son expulsados de manera continua hacia la atmósfera, formando una columna de erupción de varias decenas de kilómetros de

altura (generalmente entre 10 y 40 km). Este término hace honor a Plinio el Joven, quien describió con un gran realismo la erupción del volcán Vesubio (Italia) en el año 79 DC.

Piedra pómez: Roca volcánica de color claro, llena de cavidades que la hacen muy poco densa (frecuentemente pueden flotar en el agua). Generalmente tiene una composición dacítica a riolítica. Las cavidades se forman por la expansión de los gases volcánicos durante su salida hacia la superficie.

Punto caliente: Área de una *placa tectónica*, donde el magma asciende desde muy profundo en el manto y erupciona en la superficie del planeta.

Radiactividad: Propiedad de algunos átomos inestables de transformarse en otros átomos con la emisión de un núcleo de Helio (dos protones y dos neutrones), denominada emisión o radiactividad Alfa; o la emisión de un electrón, denominada emisión o radiactividad Beta; o la emisión de radiaciones muy energéticas, denominadas radiactividad Gama.

Reservorio magmático: ver Cámara magmática.

Riesgo volcánico: Representa los efectos dañinos de un peligro volcánico. En términos probabilísticos constituye la probabilidad de pérdida de vidas humanas, destrucción de la propiedad o pérdida de la productividad en un área afectada por un fenómeno volcánico.

Riolita: Roca volcánica de color claro, que contiene 69% o más de sílice. En estado fundido presenta una muy alta viscosidad.

Sílice: Molécula formada por un átomo de silicio y dos átomos de oxígeno (SiO_2), que constituye la base de la estructura cristalina de la mayor parte de minerales. Es el factor más importante que controla la viscosidad de los magmas. Entre más alto sea el contenido de sílice, más alta es la viscosidad.

Sismo: Sacudón del suelo producido por el movimiento abrupto y violento de una masa de roca a lo largo de una falla o fractura de la corteza terrestre. Los volcanes activos presentan una gran variedad de eventos sísmicos. **Sismos de largo período (LP)**, asociados al movimiento de fluidos magmáticos bajo presión en los conductos volcánicos. **Sismos Volcano-tectónicos (VT)**, asociados a la fracturación de rocas bajo un volcán. **Sismos híbridos**, mezcla de varios tipos de señales sísmicas.

Sismógrafo: Instrumento científico de alta precisión que detecta, amplifica y graba las vibraciones (ondas sísmicas) producidas por los sismos.

Sismograma: Registro en papel (analógico) o en la computadora (digital) de los eventos sísmicos.

Subducción: Proceso por el cual una placa tectónica colisiona con otra y se introduce en el manto terrestre bajo la otra placa. Los arcos volcánicos se forman paralelos a las zonas de subducción.

Subglaciar (erupción): Erupción volcánica que ocurre bajo un casquete glaciar. El calor proveniente de los materiales incandescentes (lava o piroclastos) produce la fusión de la nieve y el hielo.

Tefra: Término general que comprende cualquier material sólido emitido explosivamente durante una erupción volcánica (ver también ceniza, lapilli, bloques y bombas volcánicas, pómez, piroclastos, etc).

Tremor volcánico: Señal sísmica continua y rítmica que generalmente precede o acompaña las erupciones volcánicas. El tremor volcánico está asociado al movimiento de magma o de otros fluidos magmáticos al interior del conducto volcánico.

VEI: El Índice de Explosividad Volcánica (*Volcanic Explosivity Index*: VEI; Anexo 2), es una escala ampliamente utilizada para describir el tamaño de las erupciones volcánicas, basada entre otros factores, en el volumen de material emitido. La escala VEI varía entre 0 y 8. Una erupción con un VEI de 0 denota una erupción no explosiva, sin importar el volumen de productos emitidos. Las erupciones con un VEI de 5 o más son consideradas "muy grandes" y ocurren raramente alrededor del planeta (alrededor de una erupción cada década).

Vidrio volcánico: Material de origen volcánico, producido por el enfriamiento brusco del magma, al entrar en contacto con la atmósfera, con agua o con hielo.

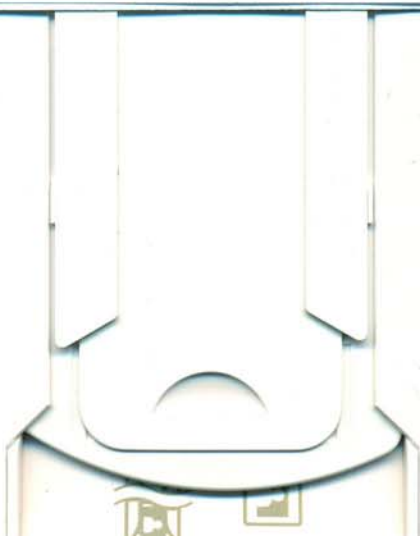
Viscosidad : Medida de la resistencia de un material a fluir en respuesta a un esfuerzo. Entre más alto sea el contenido de sílice, más alta es la *viscosidad* de una lava.

Volcán: Orificio en la superficie de la Tierra a través del cual el magma sale a la superficie. Con el mismo nombre se denomina la montaña resultado de la acumulación de material volcánico.

Volcán Escudo: Tipo de edificio volcánico caracterizado por las suaves pendientes de sus flancos, producidas por la acumulación de flujos de lava de baja viscosidad (*basaltos*).

Volcán compuesto: Tipo de edificio volcánico caracterizado por estar constituido por varios edificios volcánicos de edad diferente. Es el caso del Cayambe o del Chimborazo.

Vulcaniana (erupción): Tipo de erupción volcánica caracterizada por la ocurrencia de eventos explosivos de corta duración que emiten material en la atmósfera hasta altitudes del orden de 20 km. Generalmente, este tipo de actividad está asociada a la interacción entre el agua subterránea y el magma (erupción *freatomagmática*).



ANEXOS

ANEXO 1

Algunos problemas asociados con las caídas de ceniza volcánica

(modificado de Neall *et al.*, 1999; y Nairn, 1991)

Si usted vive cerca a un volcán en erupción, la única protección completamente efectiva es la evacuación. Por el contrario, la gente que vive a distancias moderadas a grandes del volcán pueden continuar viviendo en sus casas, siempre y cuando adopten algunas medidas de prevención.

El impacto de la caída de ceniza en las personas, animales, plantas, estructuras y maquinarias depende en gran parte del espesor del depósito. Estos efectos pueden verse incrementados en caso de lluvias, pues el peso de la ceniza aumenta con el agua. Otros pueden disminuirse con ciertas simples medidas preventivas. Con el fin de simplificar la evaluación de los peligros volcánicos asociados con las caídas de ceniza, se han establecido cinco niveles de afectación, en función del espesor de ceniza. En la siguiente tabla se detallan los efectos de las caídas de ceniza sobre los animales y personas, así como en las estructuras, maquinarias y la vegetación. En esta tabla, los espesores corresponden a ceniza no compactada.

Efectos sobre las personas y los animales

≤ 1 mm (≤ 0.1 cm) de espesor de ceniza

- Pequeño o ninguno.
- Irritación ligera de los ojos y las vías respiratorias.
- Problemas de visibilidad y presencia de lodo (en caso de lluvias) en las carreteras.

Efectos sobre la propiedad y la vegetación

- Los aeropuertos pueden verse obligados a cerrar por la posible afectación a los aviones.
- Posible contaminación de las fuentes y/o reservorios de agua.
- Podrían presentarse daños en los vehículos u otras maquinarias, debido al alto poder abrasivo de la ceniza.

Efectos sobre las personas y los animales

Efectos sobre la propiedad y la vegetación

1-5 mm (0.1-0.5 cm) de espesor de ceniza

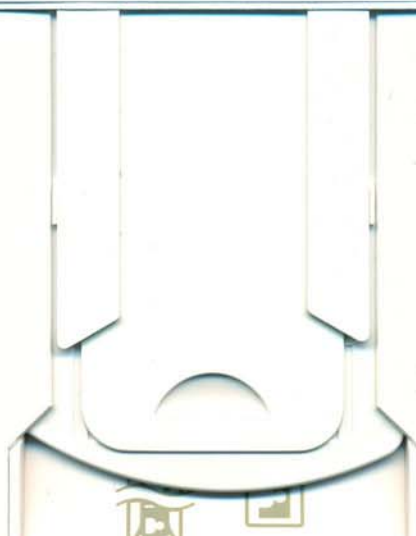
Además de los efectos causados por un espesor menor a 1 mm, se puede tener:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Problemas en las vías respiratorias.• Inflamación de los ojos.• El ganado puede ser afectado por la falta de alimentación, contaminación de las fuentes de agua o la ingestión de forrajes contaminados con ceniza.• Suministro de agua puede ser limitado o nulo.• Contaminación de las fuentes y reservorios de agua.• Las tareas de limpieza de la ceniza requerirán de grandes cantidades de agua, por lo que la continuidad en el suministro se ve afectada por la gran demanda.• Baja visibilidad.• Los insectos pueden comenzar a morir, así como algunos animales silvestres pequeños. | <ul style="list-style-type: none">• Cierre de los aeropuertos y del espacio aéreo sobre el volcán.• Posible afectación a las cosechas.• Daños menores en las casas ocasionados por la entrada de ceniza fina, daños en los acondicionadores de aire, bombas de agua, cisternas, computadoras, etc.• Posibles cortes de la electricidad y corto-circuitos, si la ceniza fina se acumula en los aisladores eléctricos y si ésta se encuentra saturada con agua.• Las rutas necesitarán limpieza permanente para reducir el riesgo de la pérdida de visibilidad.• El sistema de alcantarillado puede ser bloqueado por la ceniza o afectado por los cortes en el suministro de agua y electricidad.• Posibles daños en la maquinaria y otros equipos eléctricos.• El transporte puede ser temporalmente afectado. |
|---|---|

5-100 mm (0.5 cm-10 cm) de espesor de ceniza

Además de los efectos causados por un espesor menor a 5 mm, se puede tener:

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Serios problemas respiratorios.• El ganado puede necesitar de alimento traído de otras partes.• Los pájaros pueden ser seriamente afectados.• Pérdida temporal de la visibilidad. | <ul style="list-style-type: none">• Aplastamiento de los pastos y otros arbustos.• El follaje de algunos árboles puede ser afectado, sin embargo la mayoría de árboles pueden sobrevivir.• La mayoría de pastizales serán destruidos si el espesor de ceniza es superior a 50 mm. |
|--|---|



Efectos sobre las personas y los animales

Efectos sobre la propiedad y la vegetación

- Las cosechas serán seriamente afectadas.
- La mayoría de construcciones pueden soportar el peso de la ceniza, sin embargo las edificaciones con estructuras débiles pueden colapsar con espesores cercanos a 100 mm, sobretodo si la ceniza está húmeda.
- El tráfico en las carreteras puede ser seriamente afectado por la acumulación de ceniza. Los vehículos pueden sufrir problemas por la acumulación de ceniza en los filtros de aire.
- Cortes de la electricidad y peligro de incendios debidos a problemas eléctricos.

100-300 mm (10-30 cm) de espesor de ceniza

Además de los efectos causados por un espesor menor a 100 mm, se puede tener:

- Heridos debido al colapso de los techos de las casas.
- Si no se realiza la limpieza permanente de la ceniza acumulada en los techos de las casas, estos pueden colapsar, especialmente aquellas estructuras con techos grandes y planos, y si la ceniza está húmeda.
- Daños severos a los árboles, caída del follaje, ruptura de ramas, etc.
- Destrucción de las cosechas.
- Daños en las líneas eléctricas por la caída de ramas.

Efectos sobre las personas y los animales

Efectos sobre la propiedad y la vegetación

>300 mm (>30 cm) de espesor de ceniza

Además de los efectos causados por un espesor menor a 300 mm, se puede tener:

- Pérdidas humanas debida al colapso de los techos de las casas.
- El ganado puede morir o ser seriamente afectado.
- Muerte de la vida acuática en lagos y ríos.

- Colapso frecuente de los techos debido a la acumulación de ceniza.
- Serios daños del suministro eléctrico y problemas en las telecomunicaciones.
- El suelo será completamente cubierto de ceniza.
- Pérdida del uso del suelo por mucho tiempo (años).
- Las carreteras son inutilizables hasta su limpieza.
- Destrucción severa de la vegetación.

Protección contra las caídas de ceniza

- La ceniza debe ser removida (con el mayor cuidado posible para evitar accidentes) de los techos de los edificios y de las casas, con el fin de evitar el colapso de los mismos.
- Previo a realizar la limpieza de los techos se debe evitar que las cañerías del agua lluvia estén selladas a fin de evitar su taponamiento.
- En lo posible se debe tratar de limpiar la ceniza sin utilizar agua, para evitar el aumento del peso de la ceniza.
- Las estructuras bajas como casetas de telecomunicaciones, hidrantes contra incendios y otras estructuras ubicadas en el suelo deben ser protegidas para evitar que sean cubiertas por la ceniza.
- La ceniza se debe acumular, en lo posible, lejos de los sitios de acumulación de basura.
- En condiciones de caídas severas de ceniza, las ventanas y puertas de los edificios deben ser selladas para evitar la entrada de ceniza al interior de las edificaciones.
- Especial cuidado deben tener las personas que ingresen en edificios, para evitar que la ceniza ingrese a los edificios en la ropa o en los zapatos.
- Todos los tipos de motores deben ser protegidos ante las caídas de ceniza, para evitar su afectación.

ANEXO 2

Tamaño de las erupciones volcánicas estimado en base al Índice de Explosividad Volcánica

VOLCANIC EXPLOSIVITY INDEX (VEI)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DESCRIPCIÓN GENERAL	NO EXPLOSIVA	PEQUEÑA	MODERADA	MODERADA GRANDE	GRANDE	MUY GRANDE			
VOLUMEN DE TEFRA (m³)	1×10^4	1×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9	1×10^{10}	1×10^{11}	1×10^{12}	
ALTURA DE LA COLUMNA ERUPTIVA (km)	<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	>25			
DESCRIPCIÓN CUALITATIVA	← Apacible, Efusiva → ← Explosiva → ← Cataclísmica. Paroxismal. Colossal →								
TIPO DE ERUPCIÓN	← Estromboliana → ← Piniana → ← Hawaiana → ← Vulcaniana → ← Ultra Piniana →								

Modificado de Newhall & Self (1982) y Simkin & Siebert (1994).

ANEXO 3

Testimonio histórico

El siguiente texto (Ascásubi, 1802) fue encontrado en la obra "Alexander von Humboldt, Briefe aus Amerika, 1799-1804", la cual es una recopilación de la correspondencia de Alexander von Humboldt con diferentes personas de las Américas. El autor de esta carta es el Sr. J.J. Ascásubi, propietario de una hacienda en el sector de Cayambe, quien fue testigo de una erupción de este volcán en los años 1785-1786. Esta referencia fue gentilmente proporcionada por el Dr. Segundo Moreno (PUCE, Quito). Se han incluido en el texto (*en cursivas*) algunas explicaciones que consideramos pertinentes.

Esta montaña, bien conocida a V.S. por su situación, y altura, termina en una copa semejante a la de un Alambique, y la parte nevada, presenta a la vista por todas partes un aspecto quasi igual, a exepcion de la que mira al NND (*NNW*) este lado se ve desde el vértice del Serro, hasta su falda en que acaba la Nieve, una sección, o hendidura como si se ubiese sumergido para su interior, rompiendose las Peñas broncamente, y quedando por esto varias puntas, al modo de las que resultan quando se rompe impetuosamente una masa de materia cristalisada (*el autor se refiere al flanco N-NE del volcán*). A más de esto se ve un arenal estéril lleno de pedrones y Peñascos como rodados (*se trata de los depósitos del último flujo piroclástico del volcán; ver FP1-4, en la figura 7*), y un cauce a continuacion de la hendidura que manifiesta mui bien, que en algún tiempo corrió por él un gran volumen de agua, y últimamente la vaza de donde salía el arranque de la Boveda, o copa del Serro hundida, en términos que si no hubiese havido este estrago, presentaría a la vista un aspecto igual al resto de su circunferencia; señales todas evidentes, al parecer, de una formidable erupcion.

El tiempo en que sucedio no se puede congeturar, por que tan lejos de encontrar alguna tradicion entre los Yndios, y Blancos, se ha perdido tanto, que creían que esta Montaña no era Volcán, y la llamaban Serro pacifico o manso. En las Historias de la Conquista, que he leído, tampoco se habla de este suceso, aunque se dice algo de las reventazones, fuegos y humaredas de otros Serros; por lo que es natural, suponer que este acaecimiento fue mucho tiempo antes de la Conquista de estos Dominios.

El 8 de Febrero del año de 1785, tercer día de Carnestolendas, amanecieron los campos de Cayambe espolvoreados con tierra que havia caido del cielo...la yerva se veia blanquisea... mi primer cuidado fue examinar el grosor (*i.e. el espesor*) ...de la tierra que havia caido, y le encuentre como de una linea (*aproximadamente 1 mm*) ...era piedra quemada, y reducida quasi a polvo...Como no se tenia idea de que Cayambur fuese Volcan, se atribuyo esta Tierra ya a Cotopaxi,... ya a Saraucru, ...y ya a un Volcan baxo sin nieve distante como 30 leguas (*1 legua española equivale aproximadamente a 5 km*) al N.D. que del mismo (*podría tratarse del Cotacachi-Cuicocha, pero la distancia estaría sobre-evaluada, pues la distancia real es 50 Km*); per averiguado que ninguno de los dos primeros havia reventado, quedo la duda si sería el ultimo; quando por el mes de Julio del mismo año empeso Cayambur a hechar humo por dos vocas que tiene, y descubrió sin extrago ni movimiento alguno al S.E. quasi en linea recta, aumentandose algunas veces esta especie de explocion hasta por otra tercera que tiene mas alta en linea curba con las dos primeras, todas en el cuerpo del Serro desde poco mas arriba de la mitad para abajo: el humo era a veces tan denso, y cargado de materias combustibles, que por las noches se veia inflamado (*¿resplandor asociado a flujos piroclásticos o al crecimiento de un domo de lava?*). Ultimamente en Marzo de 1786, hizo por la voca mas baxa una erupcion de una materia mui espesa, y negra (*¿flujo de lava, flujo de lodo?*), que la tube por lodo, y cubrió como dos Leguas de largo, y una de ancho (*aproximadamente 10x5 km, se debe tener cuidado con las estimaciones*) y no se pudo examinar por que no salio de las faldas nevadas, y hay riezgo inminente de la vida en caminar por ensima de la nieve, a causa de que repentinamente se hunde esta; ...Es notable que antes, ni en la explocion misma se hubiese sentido en el Pueblo de Cayambe temblor de Tierra, ni oido bramido, o ruido algu-

no: Esto hace ver que estas vocas estaban aviertas antes de ahora: lo unico que se noto en las alturas de Tupigachi, y Tavacondo,...., que estan al frente del Serro por la parte diametralmente opuesta a la de las vocas (*Tupigachi y Tabacundo están situados al W del volcán, por lo que los centros de emisión estarían entonces en la parte oriental del edificio; sin embargo es confuso si se trata de la parte NE o SE*), esto es al S.D. fue un gran feto de quando en quando que no podian adivinar ni comprender de que era, ni de donde nacia.

Ahora diez dias (*¿probablemente 1802?*) vino a verme el Mayordomo de dicha mi hazienda, y me dijo que, actualmente estava echando humo citada Montaña por la voca mas baja... Estas son las noticias que puedo dar a V.S. de la Montaña de Cayambur, como Tgo. ocular de todo, a excepcion del ultimo punto en cumplimiento de los preceptos de V.S...

ANEXO 4

Los andinistas y los volcanes ecuatorianos

Las cumbres nevadas de los volcanes Andinos han fascinado, desde siempre a los habitantes o visitantes de estos países. Después de un largo período de respeto religioso hacia estos nevados, los exploradores europeos, entre los cuales conviene citar a Humboldt, La Condamine, Whymper, Reiss, Stübel Meyer, entre otros, ofrecieron los primeros reportes detallados de la ascensión a las cumbres ecuatorianas.

En la actualidad, el acceso relativamente fácil al pie de los glaciares, la existencia de refugios confortables, el dinamismo de las asociaciones de andinismo locales y la gran cantidad de turistas que visitan el país para intentar alcanzar los principales cumbres de más de 5 000 o 6 000 metros de altitud, hacen que, durante la temporada apropiada numerosos andinistas alcancen sus objetivos. Junto a ascensionistas aficionados, numerosos guías profesionales, que hacen del andinismo su fuente de sustento, renuevan sus esfuerzos varias veces al mes, durante casi todo el año.

Con la sola excepción de El Altar, un volcan apagado de la Cordillera Real de los Andes Ecuatorianos, la gran mayoría de los volcanes ecuatorianos que sobrepasan los 5 000 metros de altura constituyen volcanes potencialmente activos; citemos por ejemplo el Cayambe, Antisana, Cotopaxi, Chimborazo o Sangay. El Tungurahua, en actividad desde 1999, era también una cumbre preciada por los andinistas, sin embargo, su ascensión está por el momento, estrictamente prohibida. Con raras excepciones, un volcán en reposo no entra en actividad sin antes dar señales precursoras de su cambio de actividad. Así, los científicos disponen de diversos métodos de vigilancia que permitan determinar el estado de un volcán (Sección 4). En este sentido, las personas que realizan las ascensiones representan una fuente potencial de informaciones complementarias, muy interesantes, que pueden completar las informaciones científicas. En particular, los guías de alta montaña o los andinistas experimentados que realizan las ascensiones de manera periódica pueden proporcionar información importante relativa a cambios morfológicos en la cumbre o en la ruta de ascenso, cambios en la actividad fumarólica, etc. A continuación se presenta un ejemplo de "ficha de observaciones", a la cual se pueden adjuntar cualquier tipo de información complementaria como fotografías o filmaciones.

Ficha de observación

A ser enviada al
Instituto Geofísico
Escuela Politécnica Nacional
Ap. 17-01-2759
Quito- Ecuador
Fax: (593)-2-2567847
Email: geofisico@igepn.edu.ec

Nombre:

Dirección:

Teléfono:

Email:

Acompañantes:

Volcán:

Fecha de la observación:

Hora:

Lugar preciso de la observación:

Ruta de ascenso:

Altura:

Flanco:

- Tipo de observación:
- Olor a gases sulfurosos
 - Sismo, temblor
 - Avalancha de rocas o hielo
 - Cambios morfológicos importantes
 - Presencia de fumarolas, color, temperatura y caudal
 - Temperatura del suelo

☐
☐
☐
☐
☐
☐
☐

Calidad de la información:

Fecha de observación

Visibilidad:

A ser enviada al

Velocidad del viento:

Instituto Geológico

Repetición de la observación
(¿a la subida o al descenso?):

Ap. 17-01-2788

Quito-Ecuador

Fax: (593) 2 2567817

Comparación con una ascensión precedente:

Nombre:

Dirección:

E-mail:

Teléfono:

Información complementaria:

Acompañantes:

Fotografía

☐

Filmación

☐

Volcán:

Hotel:

Fecha de la observación:

Lugar preciso de la observación:

Ítem de ascenso:

Planta:

Altura:

Tipo de observación: • Olor a gases sulfurosos

• Sismo, trueno

• Avanzada de rocas o hielo

• Cambios morfológicos importantes

• Presencia de fumarolas, color

temperatura y caudal

• Temperatura del suelo

ANEXO 5

Datación por el método de Carbono-14

La utilización de isótopos radiactivos como medio de datación fue sugerido en 1912 por el físico Ernest Rutherford. Como todos conocemos, los átomos están constituidos por un *núcleo* (a su vez constituido por dos partículas diferentes, los protones y los neutrones) alrededor del cual se encuentran los electrones que "circulan" a su alrededor en "órbitas". Dado que un átomo es eléctricamente neutro, el número de partículas positivas (protones) es igual al número de partículas negativas (electrones). Por otro lado, el número de neutrones en el núcleo puede cambiar de un átomo a otro de un mismo elemento. Así, dos átomos de un mismo elemento químico (es decir con el mismo número de protones en el núcleo), pero con un número diferente de neutrones se denominan *isótopos*. El carbono es un átomo constituido por 6 protones en el núcleo y 6 electrones a su alrededor. En la naturaleza, el carbono se encuentra presente en forma de tres isótopos, dos de los cuales son estables, el Carbono-12 (denominado así porque dispone de 6 protones y 6 neutrones), el Carbono-13 (formado por 6 protones y 7 neutrones); y el tercero es un *isótopo radiactivo*, el Carbono-14 (constituido por 6 protones y 8 neutrones). De este último isótopo, se dice que es de origen radiactivo pues no es estable y con el paso del tiempo este isótopo sufre una transformación radiactiva lenta que afecta su núcleo, transformando el Carbono-14 en Nitrogeno-14 con la emisión de un electrón (a este tipo de *radiactividad* se la denomina emisión Beta).

En la naturaleza el carbono es uno de los constituyentes esenciales de los seres vivos (animales y plantas). Los dos isótopos más abundantes son los isótopos estables; el Carbono-12 que corresponde al 98,86 % del carbono total, y el Carbono-13 que corresponde al 1,1 %. El Carbono-14, representa una cantidad muy limitada, del orden de un átomo por cada 1000 millones de átomos de carbono. A pesar de su escasez, el Carbono-14 está siempre presente en la parte externa de la Tierra y en el CO_2 de la atmósfera, básicamente por dos razones: (1) a pesar de ser un isótopo radiactivo, su «*período o tiempo de vida medio*» es relativamente

largo, del orden de 5630 años ; y, (2) el hecho que en las partes altas de la atmósfera, por acción de los rayos cósmicos, una pequeña cantidad de los átomos de Nitrógeno están siendo constantemente transformados en átomos de Carbono-14.

Así, dado que el Carbono-14 está presente en la atmósfera, es incorporado de igual manera que los otros dos isótopos de Carbono en las moléculas orgánicas que constituyen las células de todos los seres vivos. La relación entre Carbono-14 y Carbono-12 se mantiene constante durante la vida de los animales y plantas. Luego de la muerte de los mismos, dado que no se producen más intercambios entre el ser vivo y la atmósfera, el contenido de Carbono-14 de los restos orgánicos del antiguo ser vivo decrece de manera exponencial con el tiempo, según la ley de desintegración radiactiva. La medida de la radiactividad del Carbono-14 permite determinar la edad de dichos restos orgánicos.

El método de datación por Carbono-14 fue desarrollado por el químico Willard F. Libby en 1946 (Arnold & Libby, 1951), recibiendo por ello el Premio Nobel de Química en el año 1960. En los años subsiguientes, este método fue rápidamente desarrollado, siendo ampliamente utilizado en campos tan diversos como la arqueología, la paleoclimatología y la geología, para datar eventos ocurridos hasta 40000 años antes del presente. En la actualidad, gracias a los adelantos analíticos que permiten determinar cada vez concentraciones más pequeñas de Carbono-14, la escala de datación de este método se ha extendido hasta los 50000 años aproximadamente.

En geología y arqueología, este método ha sido principalmente utilizado para la datación de restos orgánicos como restos vegetales, huesos, niveles de turba, paleosuelos así como restos vegetales carbonizados. Según la riqueza en carbono del material a datar, la antigüedad del mismo y el método de análisis utilizado, es necesario disponer entre 2 miligramos y 2 gramos de material como mínimo, teniendo especial cuidado que el material no haya sido « contaminado » con material orgánico más reciente.

En el caso del volcán Cayambe, la cronología de la actividad reciente del volcán durante los últimos miles de años fue obtenida gracias a la datación de fragmentos vegetales carbonizados en uno de los últimos eventos volcánicos (ver por ejemplo un flujo del flan-

co Norte del volcán, figura 20). Adicionalmente, una serie de dataciones realizadas en dos secciones dentro de una turbera, ubicada en el flanco Sur-Occidental del volcán, cerca al Refugio, permitió determinar una edad aproximada para la mayoría de los eventos volcánicos de los últimos 4000 años (Figura 10). En efecto, la turbera constituyó una trampa ideal que preservó los diferentes niveles de cenizas y piroclastos de las principales erupciones del volcán. Así, al datar por Carbono-14 la turba inferior a cada nivel de ceniza importante se pudo asignar una edad aproximada a cada uno de estos eventos volcánicos.

Este libro es la continuación de la serie Los peligros volcánicos en el Ecuador, preparada por el Instituto Geológico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito y la Unidad de Investigación y Desarrollo Científico del IIRD (Instituto de Investigación y Desarrollo Científico) dentro de un convenio de cooperación existente entre las entidades.

Títulos publicados:

No. 1: Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua.

En preparación:

No. 2: Los peligros volcánicos asociados con el Cotacachi.

No. 3: Los peligros volcánicos asociados con el Imbabura.

Este libro es la continuación de la serie Los peligros volcánicos en el Ecuador, preparada por el Instituto Geológico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito y la Unidad de Investigación y Desarrollo Científico del IIRD (Instituto de Investigación y Desarrollo Científico) dentro de un convenio de cooperación existente entre las entidades.

Títulos publicados:

No. 1: Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua.

En preparación:

No. 2: Los peligros volcánicos asociados con el Cotacachi.

No. 3: Los peligros volcánicos asociados con el Imbabura.

Referencia de este libro:

Pablo Samaniego, Jean-Philippe Eissen, Michel Monzier, Claude Robin, Alexandra Alvarado, Hugo Yepes

2004

Serie Los peligros volcánicos en el Ecuador, No. 2

Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe

Corporación Editora Nacional, IG-EPN, IRD.

Este libro es la continuación de la serie *Los peligros volcánicos en el Ecuador*, preparada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito y la Unidad de Investigación *Procesos y riesgos volcánicos* del IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*: Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) dentro de un convenio de cooperación existente entre estas entidades.

Títulos publicados:

No 1: Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua

En preparación:

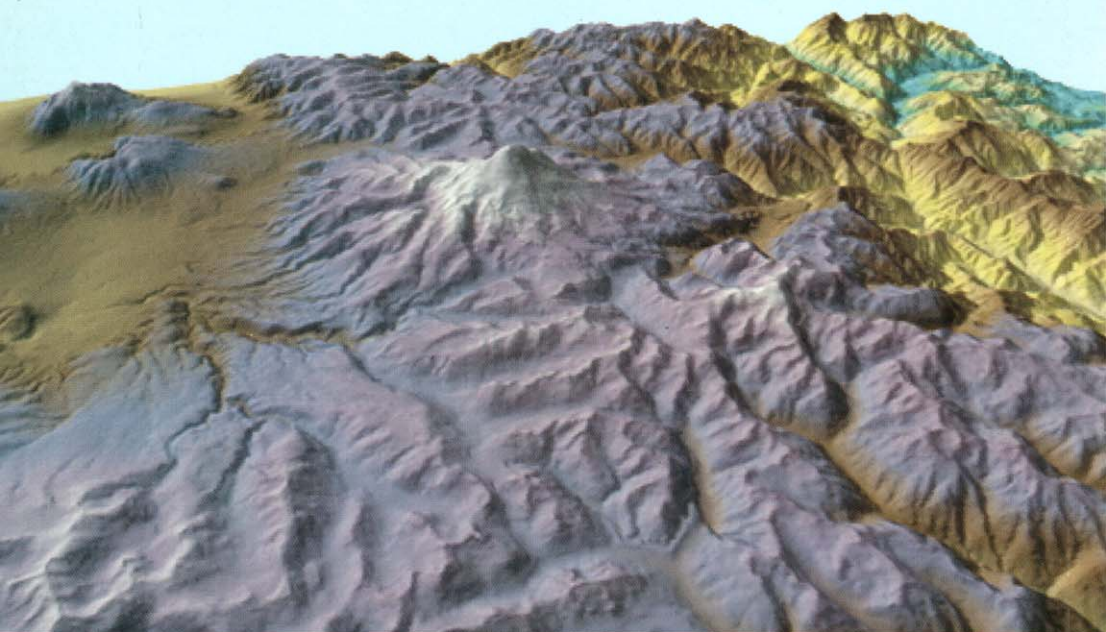
No. 3: Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi

No. 4: Los peligros volcánicos asociados con el Pichincha

Foto Contraportada. Modelo numérico del terreno (MNT) del volcán Cayambe y sus alrededores. Línea de vista del sur-occidente al nor-orienté. El MNT fue generado a partir de los mapas topográficos a escala 1:50000 del Instituto Geográfico Militar (IGM), los cuales fueron proporcionados en forma digital por el Dr. Marc Souris (IRD).

Investigaciones realizadas por el Instituto Geofísico y el IRD, demuestran que el Cayambe, que hasta hace poco era considerado como un volcán “apagado”, ha tenido una importante actividad eruptiva en los últimos miles de años, encontrándose inclusive evidencias de una pequeña erupción en la época histórica (1785-1786). ¿Cuál ha sido su comportamiento durante sus últimas erupciones? ¿cuáles serían las zonas potencialmente afectadas en caso de una erupción? ¿cómo está siendo monitoreado?

En esta segunda entrega de la *Serie Los Peligros Volcánicos en Ecuador*, se responde a estas inquietudes y se delinean las medidas a tomar por parte de las autoridades y de la ciudadanía para estar preparados en caso de una potencial reactivación de este volcán.



LEYENDA

Zona afectada por la caída de ceniza



Recorrido de lahares



SIGNOS CONVENCIONALES

Capital de Provincia



Cabecera Cantonal



Parroquia



Carretera Asfaltada



Carretera Afirmada



Carretera de Verano



Aeropuerto, Pista



Línea de Ferrocarril



Represa, Embalse



Río Doble



Río Perenne



Oleoducto Transecuatoriano



Límite Provincial Legal



Límite Provincial Referencial



Límite Internacional

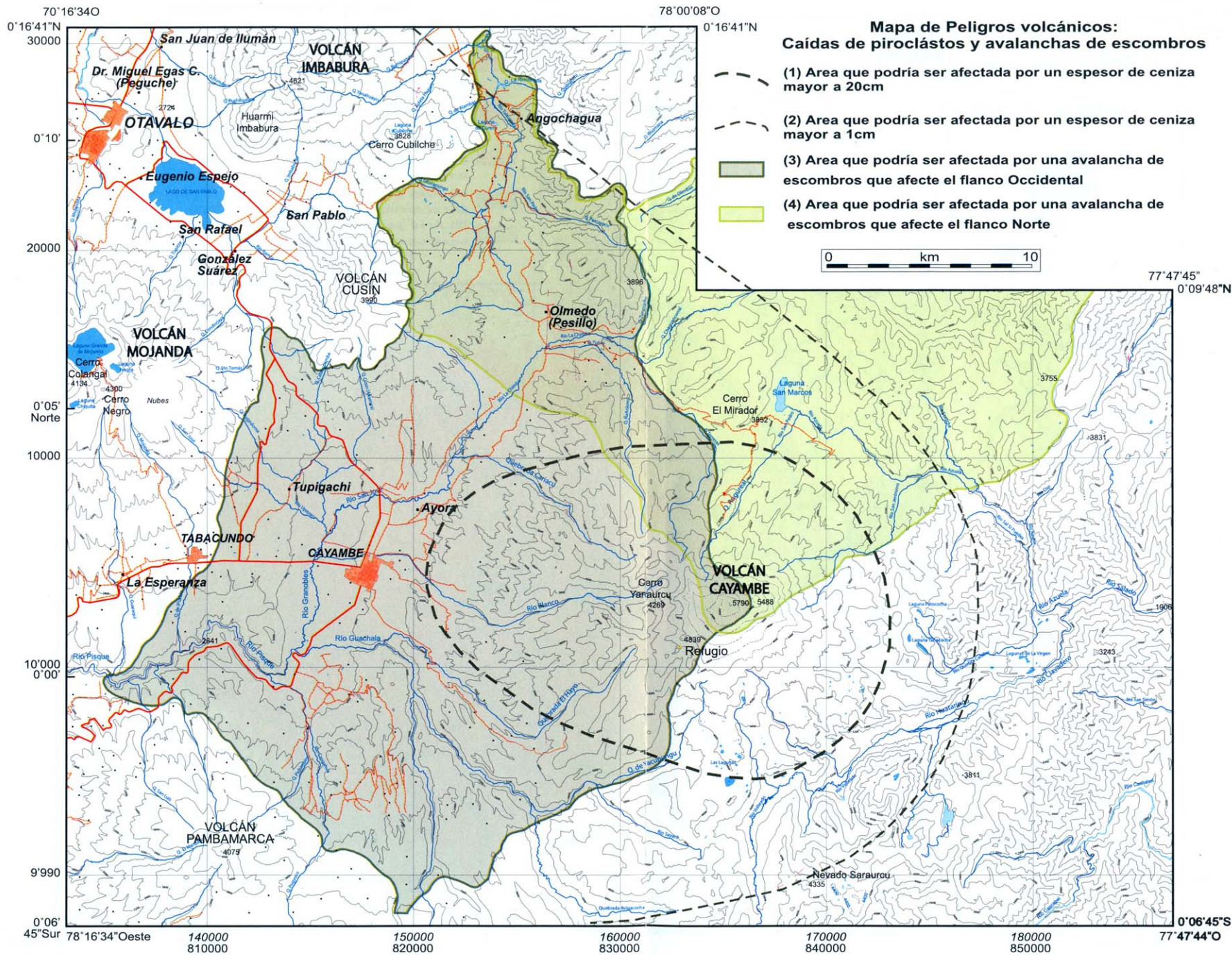


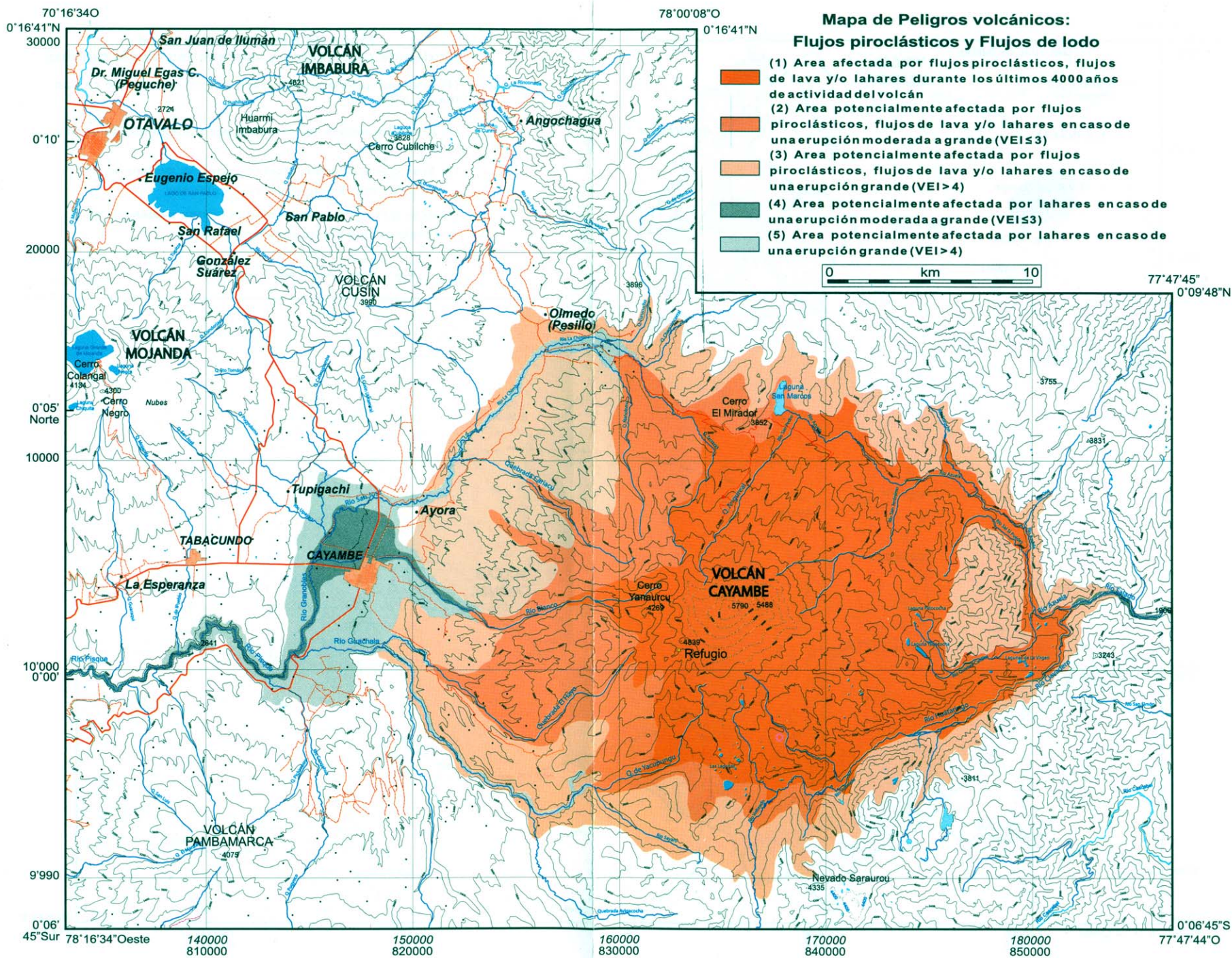
Área del mapa



Escala del original 1:1000.000

Figura 2. Mapa de ubicación del volcán Cayambe y de su área de influencia. La fértil planicie de Cayambe se encuentra ubicada inmediatamente al Occidente del volcán y está atravesada por el río Blanco, el cual descendiendo directamente de la cumbre del volcán. Está incluida la ubicación del nuevo aeropuerto de Quito en el sector de Pumbio. Fuente: IGM. 2002.





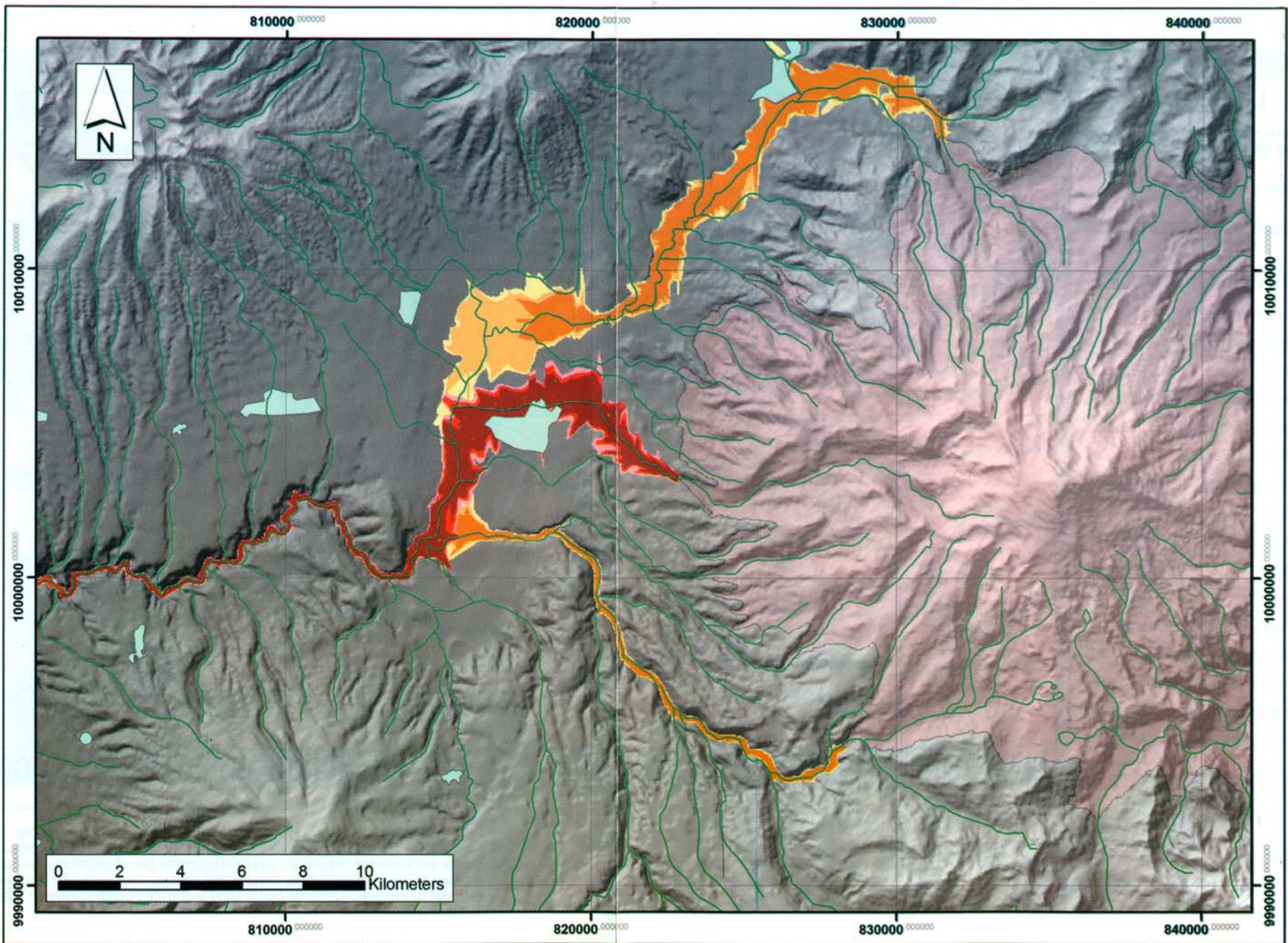


Figura 23. Zonas potencialmente afectadas por flujos de lodo y escombros (lahares) para el volcán Cayambe, realizado con la ayuda del Programa LAHARZ (Schilling et al., 1998). Ver página 44.